LIVRARIA
CRUZ COUTINHO
DE J. R. DOS SANTOS
76 Rua de S. José 76
RIO DE JANEIRO

José Bonifácio de Andrada

TRAITÉ

DE

PHYSIQUE ÉLÉMENTAIRE

DE

CH. DRION ET É. FERNET

ENTIÈREMENT REVU ET MODIFIÉ

PAR É. FERNET

DOUZIÈME ÉDITION

PAR MM.

É. FERNET
Inspecteur général de l'Instruction publique
Ancien professeur de physique au lycée Saint-Louis

A. CHERVET
Professeur de physique au lycée Saint-Louis
Ancien élève de l'École normale supérieure

AVEC 706 FIGURES DANS LE TEXTE

VENDE-SE NA LIVRARIA UNIVERSAL DE SCHENIQUE & IRMÃO PELOTAS E PORTO ALEGRE

PARIS

G. MASSON, ÉDITEUR

120, BOULEVARD SAINT-GERMAIN

M D CCC XCIII

8 530 F362K

UFRJ
Centro de Ciências Matemática e da Natureza
Biblioteca Central
N.º REGISTRO
044417-0
DATA
26/10/94
ORIGEM

— *Tous droits réservés* —

L'édition actuelle diffère des précédentes en un grand nombre de points : nous signalerons seulement les plus importants.

Les unités du Système C. G. S., fixées par le Congrès réuni à Paris en 1881, sont adoptées aujourd'hui par les physiciens du monde entier. Les unités pratiques qui s'y rattachent ont pénétré jusque dans le langage de l'industrie, et l'on pourrait presque dire dans le langage usuel. Dès les premières pages de ce Traité, dans les notions préliminaires qui lui servent d'introduction, on trouvera les définitions de ces diverses unités, et les rapports qu'elles présentent avec les unités anciennes. Dans toute la suite, on a toujours fait usage de ces unités nouvelles, soit dans le cours de l'exposition, soit pour y rapporter les résultats numériques obtenus, à diverses époques, par les physiciens.

Le principe de la conservation de l'énergie, énoncé également dès les premières pages, a pu être invoqué dans tout le cours de l'ouvrage, et servir à donner aux démonstrations plus de simplicité et de rigueur.

L'hydrostatique a été simplifiée, et sensiblement réduite, par la suppression de développements qui ont aujourd'hui perdu de leur importance. Les définitions de la pression en un point d'un liquide, ou de la force élastique d'une masse gazeuse, ont été données avec plus de précision.

Des observations analogues s'appliquent à l'étude de la chaleur.

Dans l'optique, on a cherché à présenter d'une manière plus claire l'étude des instruments, particulièrement en ce qui concerne la puissance de la loupe ou du microscope, considérée comme l'expression réelle de leur degré d'efficacité.

Enfin, de toutes les parties de l'ouvrage, c'est l'étude de l'électricité et du magnétisme qui a subi les modifications les plus profondes : à vrai dire, la méthode d'exposition et la rédaction en ont été entièrement transformées. Nous croyons devoir y insister d'une manière particulière.

Dans l'électricité statique, en prenant comme point de départ la théorie de Gauss, on a pu y rattacher, d'une part, les notions relatives à la distribution de l'électricité à la surface des conducteurs électrisés ou placés dans un champ électrique; d'autre part, une définition précise de la densité électrique et de la tension électrostatique en un point de la surface. — Le potentiel électrique a été défini par le travail, et, tout en restant dans les limites d'un enseignement élémentaire, on a cherché à déduire de cette définition les principales conséquences qu'elle comporte, particulièrement en ce qui concerne la capacité électrique d'un conducteur et l'énergie électrique d'un corps électrisé. — Les unités pratiques, coulomb, volt, farad, ampère, ohm, etc., ont été définies, en même temps que les unités absolues correspondantes, à mesure que l'occasion s'en est présentée; on en a fait constamment usage dans l'étude de l'électricité statique et de l'électricité dynamique.

On a pu simplifier le chapitre du magnétisme, tout en présentant, avec une précision suffisante, les notions du moment magnétique et de l'intensité d'aimantation qui caractérisent un aimant déterminé.

Dans l'électricité dynamique, la force électromotrice d'une pile est definie par le nombre qui exprime, en joules, l'énergie qu'elle développe dans le courant, pour chaque coulomb mis en mouvement dans le circuit fermé : on montre, par un raisonnement simple, que ce même nombre exprime aussi, en volts, la différence de potentiel aux deux pôles de la pile, quand le circuit est ouvert.

Dans le chapitre relatif aux lois des courants, les lois d'Ohm sont présentées comme résultant d'expériences effectuées simultanément avec un électromètre et avec un galvanomètre ; la loi de Joule, comme une conséquence des lois d'Ohm et du principe de la conservation de l'énergie.

Le chapitre de l'électromagnétisme repose tout entier sur la considération du champ magnétique créé par un courant, et sur la disposition des lignes de force de ce champ, dans quelques cas particulièrement simples. L'étude des galvanomètres, celle des mouvements imprimés à un aimant par un courant, ou à un courant par un aimant, deviennent à la fois plus simples et plus précises. — L'étude de l'électrodynamique (actions des courants sur les courants), rattachée à celle de l'électromagnétisme, est, par cela même, notablement simplifiée.

Enfin, la production des courants induits étant présentée, d'après la loi de Lenz, comme une conséquence du principe de la conservation de l'énergie, on a pu définir la force électromotrice de ces courants comme l'avait été celle du courant d'une pile. — Les recherches récentes auxquelles ont donné lieu les courants alternatifs, de grande fréquence et de grande force électromotrice, l'emploi des machines d'induction pour le transport de l'énergie électrique à grande distance, ont été l'objet de quelques développements, suffisants, pensons-nous, pour initier l'élève à quelques-unes des applications scientifiques ou industrielles de cette partie de l'électricité.

Comme dans les éditions précédentes, on a mis en plus petit caractère un certain nombre de paragraphes, qui pourront être laissés de côté à une première lecture.

Les problèmes placés à la fin du volume ont été entièrement revus ; le nombre en a été presque doublé.

Nous avons été secondés dans notre tâche par les observations qui nous ont été transmises par un certain nombre de profes-

seurs : nous les prions d'agréer ici tous nos remerciements. Nous recevrons toujours avec reconnaissance les critiques ou les observations nouvelles qu'ils voudront bien nous adresser, à mesure qu'elles leur seront suggérées par la pratique de leur enseignement.

F. et Ch.

TRAITÉ

DE

PHYSIQUE ÉLÉMENTAIRE

NOTIONS PRÉLIMINAIRES

I. — NOTIONS DE MÉCANIQUE

MOUVEMENTS. — FORCES

1. Mouvement en général. — On appelle *trajectoire* d'un point en mouvement, la ligne tracée par les positions successives de ce point. — Le mouvement est dit *rectiligne* ou *curviligne*, selon que la trajectoire est une ligne droite ou une ligne courbe.

Pour que le mouvement d'un point soit complètement défini, il ne suffit pas que l'on connaisse la trajectoire, il faut que l'on connaisse encore la loi suivant laquelle il la parcourt. Dans chacun des mouvements simples que nous allons étudier, il est facile d'obtenir une relation entre les valeurs du *temps t*, compté à partir d'un instant déterminé, et les valeurs correspondantes de l'*espace e* qui sépare le point mobile d'un point fixe pris sur la trajectoire, cet espace étant compté sur la trajectoire elle-même. — Une pareille relation prendra le nom d'*équation du mouvement sur la trajectoire*.

En Mécanique, on prend généralement comme unité de temps la *seconde*; comme unité de longueur, le *mètre*.

2. Mouvement uniforme. — Un mouvement est dit *uniforme*, lorsque les espaces parcourus dans des intervalles de temps égaux sont égaux, quels que soient ces temps. On appelle *vitesse* d'un mouvement uniforme, l'espace parcouru dans un intervalle de temps égal à l'unité.

L'*unité de vitesse* est la vitesse d'un mobile qui parcourt, d'un mouvement uniforme, l'unité de longueur dans l'unité de temps.

La définition même du mouvement uniforme donne immédiatement la forme de l'équation de ce mouvement. — Soit v le nombre constant qui exprime la vitesse, et convenons, pour plus de simplicité, de compter les espaces à partir du point où se trouve le mobile à l'instant pris pour origine du temps; au bout d'un nombre t de secondes, la distance e qui sépare le mobile de l'origine des espaces sera

$$e = vt.$$

Étant donné un point animé d'un pareil mouvement, il suffira, pour déterminer la vitesse v, de mesurer l'espace parcouru, et de diviser cet espace par le temps employé à le parcourir.

3. Mouvement varié. — Vitesse moyenne entre deux instants déterminés. — Vitesse à un instant déterminé. — Un mouvement est dit *varié*, lorsque les espaces parcourus dans des intervalles de temps égaux ne sont pas égaux.

Soit AB (*fig.* 1) la trajectoire d'un mobile animé d'un mouvement varié. Soit A le point où se trouve le mobile à l'instant pris pour origine

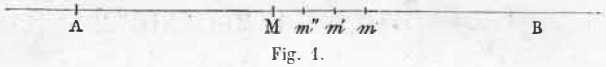


Fig. 1.

du temps, et convenons de compter les espaces à partir de ce point. Soit M la position du mobile à l'instant t; désignons la longueur AM par e, cette quantité étant comptée positivement dans le sens AB. Soit Am l'espace parcouru à l'instant $t + \theta$; désignons-le par $e + \varepsilon$. La longueur Mm ou ε est celle que le mobile a parcourue pendant l'intervalle de temps θ. Or on peut concevoir un second mobile parcourant cette même longueur, non plus d'un mouvement varié, mais d'un mouvement uniforme, dans le même intervalle de temps : d'après ce qu'on vient de voir, la vitesse de ce mobile serait $\frac{\varepsilon}{\theta}$. Cette vitesse est ce qu'on nomme la *vitesse moyenne* du premier mobile, entre les deux instants t et $t + \theta$: elle s'obtient, comme on voit, en divisant l'accroissement ε de l'espace par l'accroissement θ du temps.

Considérons maintenant, au lieu de l'accroissement θ donné au temps t, un accroissement plus petit θ'; l'espace parcouru AM sera accru seulement de Mm' ou ε', et la vitesse moyenne, entre le temps t et le temps $t + \theta'$, sera $\frac{\varepsilon'}{\theta'}$. De même, pour un accroissement de temps encore plus petit θ'', l'accroissement d'espace étant Mm'' ou ε'', la vitesse moyenne entre le temps t et le temps $t + \theta''$ sera $\frac{\varepsilon''}{\theta''}$; et ainsi de suite. Or, si l'on fait décroître indéfiniment les intervalles θ, θ', θ''..., les quo-

tients $\frac{\varepsilon}{\theta}$, $\frac{\varepsilon'}{\theta'}$, $\frac{\varepsilon''}{\theta''}\cdots$ tendent en général vers une limite déterminée; cette limite est ce qu'on nomme la *vitesse à l'instant t*. — On appelle donc *vitesse à un instant déterminé*, la limite vers laquelle tend le rapport de l'accroissement ε de l'espace à l'accroissement θ du temps, lorsque θ converge vers zéro.

On voit que la vitesse doit être considérée comme positive ou négative, selon que ε est lui-même positif ou négatif.

4. Mouvement uniformément varié. — Un mouvement est dit *uniformément varié*, lorsque la vitesse varie de quantités égales en des temps égaux, quels que soient ces temps. On appelle *accélération*, dans un pareil mouvement, la variation de la vitesse dans l'unité de temps.

Le mouvement est *uniformément accéléré* ou *uniformément retardé*, selon que l'accélération et la vitesse sont de même signe ou de signes contraires.

L'*unité d'accélération* est l'accélération d'un mobile animé d'un mouvement uniformément varié, et dont la vitesse varie d'une unité de vitesse dans l'unité de temps.

Considérons, par exemple, un mobile animé d'un mouvement *uniformément accéléré*. Soit v_0 sa vitesse initiale, c'est-à-dire sa vitesse à l'instant pris pour origine du temps; soit γ l'accélération, c'est-à-dire l'accroissement de la vitesse au bout d'une unité de temps; nous supposerons v_0 et γ positifs. Si l'on désigne par v la vitesse au bout du temps t, on a, d'après la définition même de l'accélération,

$$v = v_0 + \gamma t. \tag{1}$$

Cette équation peut se transformer en une autre, qui donne l'espace parcouru e, compté à partir du point où se trouvait le mobile à l'origine du temps. — On démontre en effet, par un raisonnement pour lequel nous renverrons aux Traités de Mécanique, que la relation (1) conduit à la relation équivalente

$$e = v_0 t + \frac{\gamma t^2}{2} \text{ (*)}. \tag{2}$$

(*) On peut vérifier que, réciproquement, la relation (1) se déduit de la relation (2). — Si, dans la formule (2), on donne au temps la valeur $t + \theta$, l'espace prend une valeur

$$e + \varepsilon = v_0 (t + \theta) + \frac{1}{2}\gamma (t + \theta)^2$$
$$= e + v_0\theta + \frac{1}{2}\gamma (2t\theta + \theta^2);$$

Or ε est précisément l'espace parcouru pendant l'intervalle de temps θ; d'après ce qui a été dit (3), la vitesse moyenne pendant cet intervalle est $\frac{\varepsilon}{\theta}$, c'est-à-dire $v_0 + \frac{1}{2}\gamma (2t + \theta)$. — Quand on fait converger θ vers zéro, cette valeur de la vitesse moyenne tend vers la limite $v = v_0 + \gamma t$.

Remarque. — Si l'on considère le cas particulier où la vitesse initiale est nulle, on a $v_0 = 0$; alors la formule (1) devient

$$v = \gamma t,$$

c'est-à-dire que, dans ce cas particulier, *les vitesses sont proportionnelles aux temps.*

La formule (2) devient, dans la même hypothèse,

$$e = \frac{\gamma t^2}{2},$$

c'est-à-dire que *les espaces sont proportionnels aux carrés des temps.*

Enfin, si l'on élimine le temps t entre les deux équations que l'on vient d'obtenir, on a

$$v = \sqrt{2\gamma e},$$

c'est-à-dire que *les vitesses sont proportionnelles aux racines carrées des espaces parcourus.*

L'une quelconque de ces trois lois, qui se déduisent les unes des autres, suffit pour caractériser le mouvement. — Ces divers résultats trouveront leur application dans l'étude des mouvements des corps sous l'action de la pesanteur.

5. Principe de l'inertie. — *La matière ne peut modifier d'elle-même ni son état de repos, ni son état de mouvement.*

Nous appellerons *point matériel* tout corps, c'est-à-dire toute portion de matière, de dimensions assez petites pour qu'on puisse l'assimiler à un point géométrique. — Par l'énoncé général du principe de l'inertie, on doit entendre :

1° Qu'un point matériel en repos, si aucune cause n'agit sur lui, demeure en repos : c'est ce qu'on peut appeler l'*inertie dans le repos;*

2° Qu'un point matériel en mouvement, si aucune cause n'agit sur lui, conserve indéfiniment un mouvement rectiligne et uniforme : c'est ce qu'on peut appeler l'*inertie dans le mouvement.*

Le principe de l'inertie dans le mouvement a été énoncé pour la première fois par Képler : il paraît, au premier abord, contredit par un certain nombre de faits d'observation; un examen attentif montre qu'il n'y a qu'une contradiction apparente (*).

6. Forces. — Effets dynamiques et effets statiques. — On appelle *force*, toute cause capable de produire le mouvement, ou d'en modifier la nature.

L'existence des forces peut nous être révélée par des phénomènes très divers. Si un point matériel, primitivement en repos, se met en

(*) Si, par exemple, une bille lancée sur un plan horizontal ne continue pas à se mouvoir indéfiniment, c'est que le frottement de la bille sur le plan a pour effet de diminuer progressivement sa vitesse, jusqu'à la rendre nulle.

mouvement, c'est qu'une force agit sur lui. Si un point matériel est animé d'un mouvement rectiligne et accéléré, c'est qu'il est soumis à l'action d'une force, dans la direction du mouvement, et dans le même sens, etc. — Ces effets des forces, se manifestant par la production ou par une modification du mouvement, peuvent être désignés sous le nom d'*effets dynamiques*.

Lorsque les points soumis à l'action des forces sont assujettis de façon à rester immobiles, l'existence des forces se manifeste par d'autres effets, auxquels on donne le nom d'*effets statiques*. — Ainsi, un corps pesant, placé en repos sur un plan horizontal, produit une *pression*, qui arriverait à rompre le plan si le poids du corps dépassait une certaine limite. Le même corps, suspendu à un fil, produit sur ce fil une *tension*. Enfin, un corps pesant, suspendu à un ressort comme celui de la figure 3, produit sur lui une *flexion* (*). — Ces divers effets peuvent servir, non seulement à constater l'existence des forces, mais aussi à les mesurer, comme nous allons le voir.

7. Mesure des forces. — On dit, en général, que deux forces sont *égales* lorsque, agissant sur un même corps, dans les mêmes conditions, elles produisent un même effet.

Pour comparer entre elles des forces inégales, il faut admettre le principe suivant, qui est confirmé par la vérification de ses conséquences : *Lorsque plusieurs forces agissent simultanément sur un point, l'action de chacune d'elles est la même que si elle agissait seule.*

Ce principe étant admis, on dit qu'une force F est égale à *n fois* une autre force *f*, lorsqu'elle produit, dans les mêmes conditions, le même effet que *n* forces égales à *f*, agissant simultanément.

8. Dynamomètres. — On désigne sous le nom de *dynamomètres*, des instruments qui sont destinés à mesurer les forces par les effets de flexion qu'elles font éprouver à un ressort (*fig.* 3, 4, 5).

La figure 2 représente un dynamomètre formé d'une lame d'acier flexible ABC, recourbée en forme de V; à chacune de ses extrémités, A, C, est fixé un arc métallique qui traverse une ouverture pratiquée près de l'autre extrémité. L'un de ces arcs se termine par un anneau D, qui sert à soutenir l'instrument (*fig.* 3); l'autre, par un crochet E. Pour graduer l'instrument, on suspend successivement, au crochet E, des poids de 1, 2, 3, 4 kilogrammes, etc.; le ressort s'infléchit de plus en plus, et l'on marque, à chaque fois, le point de l'arc extérieur MD qui

(*) Dans chacun de ces cas, la résistance offerte par le plan, par le fil, ou par le ressort, doit être considérée comme développant une *réaction*, égale et contraire à l'*action* que la pesanteur exerce sur le corps. Il est clair en effet que, si l'on supprimait le plan, le fil ou le ressort, on devrait, pour maintenir le corps en repos, lui appliquer une force égale et contraire à son poids. — Newton a montré que c'est là un principe général. Une force quelconque, appliquée à un corps en repos ou en mouvement, détermine toujours une *réaction*, représentée par une force égale et contraire.

correspond à l'ouverture de la branche A qu'il traverse. — Si maintenant on attache l'anneau à un point fixe, à l'aide d'une corde R, par

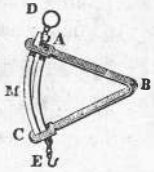


Fig. 2.

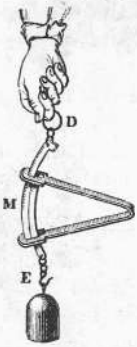


Fig. 3.

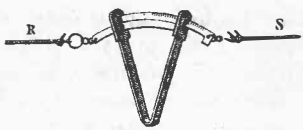


Fig. 4.

Fig. 5.

exemple (*fig.* 4), et si l'on applique au crochet une force quelconque par l'intermédiaire d'une autre corde S, il se produira, comme précédemment, une flexion du ressort ; selon que cette flexion sera égale à celle que déterminait un poids de 2, 4, 10 kilogrammes, on dira que l'*intensité de la force est de* 2, 4, 10 *kilogrammes*. — L'*unité de force* sera alors *le poids du kilogramme*.

9. Une force constante, agissant seule sur un point matériel entièrement libre, lui imprime un mouvement uniformément accéléré. — La démonstration de ce théorème repose sur le principe suivant, qu'on doit encore considérer comme confirmé par la vérification de ses conséquences : *L'action d'une force sur un point matériel est indépendante du mouvement dont ce point est primitivement animé : elle est la même que si le point était au repos.*

Ce principe étant admis, soit une force F agissant sur un point matériel que nous supposerons d'abord au repos : elle lui imprime, au bout d'une seconde, une certaine vitesse γ. Si la force cessait alors d'agir, le point continuerait à se mouvoir, d'un mouvement rectiligne et uniforme, avec la vitesse γ (5,2°) ; si donc la force F agit sur lui pendant un nouvel intervalle de temps égal à une seconde, son action étant indépendante du mouvement dont le point est animé, elle lui communique, au bout de ce temps, une nouvelle vitesse γ s'ajoutant à la première, en sorte que la vitesse au bout de deux secondes est 2γ ; et ainsi de suite. Donc, au bout du temps t, la vitesse est

$$v = \gamma t,$$

c'est-à-dire que le mouvement est uniformément accéléré.

Il est clair que la même démonstration s'applique au cas où le point serait animé d'une vitesse initiale v_0 : dans ce cas, la vitesse au bout du temps t serait exprimée par $v_0 + \gamma t$.

10. Deux forces constantes sont entre elles comme les accélérations qu'elles impriment à un même point matériel. — Soient deux forces F, F′ ; supposons qu'elles aient une commune mesure f, et qu'on ait

$$F = nf, \quad F' = n'f, \quad \text{et par suite } \frac{F}{F'} = \frac{n}{n'}.$$

Si la force f agissait seule sur le point matériel considéré, elle lui imprimerait un mouvement uniformément accéléré, dont nous pouvons représenter l'accélération par α. Donc, si n forces égales à f agissent simultanément sur ce même mobile, puisque l'action de chacune d'elles est indépendante de celles des autres (7), elles lui imprimeront une accélération n fois plus grande, c'est-à-dire $n\alpha$. De même, si n' forces égales à f agissent simultanément sur le même mobile, l'accélération produite sera $n'\alpha$. On a donc, en désignant par γ et γ' les accélérations imprimées par F et par F′, $\gamma = n\alpha$, $\gamma' = n'\alpha$, et par suite, $\frac{\gamma}{\gamma'} = \frac{n}{n'}$; d'où l'on déduit :

$$\frac{\gamma}{\gamma'} = \frac{F}{F'}.$$

En général, le mobile sur lequel on fait agir successivement des forces différentes est un corps de dimensions finies ; mais, si tous les points de ce corps sont animés de la même vitesse au même instant, tout se passe comme si la matière en mouvement était réunie en un seul point ; un pareil mobile se comporte donc comme un point matériel, et la proposition reste applicable.

11. Masse. — L'équation que nous venons d'obtenir peut s'écrire :

$$\frac{F}{\gamma} = \frac{F'}{\gamma'}.$$

Or, si l'on faisait agir sur le même corps une autre force F″, le rapport de cette force à l'accélération γ'' qu'elle produirait serait encore le même ; on a donc, pour toutes les forces appliquées à un même corps :

$$\frac{F}{\gamma} = \frac{F'}{\gamma'} = \frac{F''}{\gamma''} = \ldots = m.$$

Ce rapport constant m est ce qu'on nomme la *masse* du corps, ou sa *quantité de matière*. — On appelle donc, d'une manière générale, *masse* d'un corps, *le nombre constant qui exprime le rapport d'une force quelconque à l'accélération qu'elle imprime à ce corps*.

Si maintenant on considère, en particulier, parmi les forces qui peuvent agir sur un corps, celle qui résulte de l'action de la pesanteur sur lui, c'est-à-dire son poids P, et si l'on désigne par g l'accélération qu'il prend sous cette action (accélération que nous verrons être *la même pour tous les corps en un même lieu*), on aura

$$\frac{P}{g} = m.$$

On peut donc appeler, en particulier, *masse* d'un corps, *le rapport de son poids à l'accélération qu'il prend sous l'action de la pesanteur.*

Cette expression $\frac{P}{g}$ comprend, d'une part, la quantité P, qui dépend de l'*unité de force*; d'autre part, la quantité g, qui dépend de l'*unité de longueur* et de l'*unité de temps*, puisque l'accélération est la variation éprouvée par la vitesse dans l'unité de temps. Si, comme on le fait ordinairement en Mécanique, on prend comme unité de force le poids du kilogramme, comme unité de longueur le mètre et comme unité de temps la seconde, on doit avoir, pour le corps dont la masse est l'unité, $P = g$. Dès lors, dans ce système d'unités, la valeur de l'accélération à Paris étant exprimée par le nombre 9,81, l'*unité de masse* est la masse d'un corps dont le poids à Paris est $9^{kil},81$.

12. Mesure des forces constantes, par les accélérations qu'elles produisent. — Outre l'emploi des *dynamomètres*, qui permettent de mesurer les forces par les flexions qu'elles produisent sur un ressort, nous avons maintenant un autre moyen de mesure, fondé sur l'observation des effets de mouvements.

Soit un corps dont on connaisse préalablement la masse m; si l'on peut observer l'accélération γ qu'imprime à ce même corps la force qu'on se propose de mesurer, on aura, entre la valeur inconnue F de la force et l'accélération connue γ, la relation $\frac{F}{\gamma} = m$, d'où l'on déduira *la valeur de la force*

$$F = m\gamma.$$

COMPOSITION DES FORCES

13. Représentation géométrique des forces. — Une force est complètement définie lorsqu'on donne : 1° son *point d'application*, c'est-à-dire le point sur lequel s'exerce son action; 2° sa *direction*, c'est-à-dire la direction du mouvement qu'elle tend à imprimer à ce point; 3° son *intensité*, c'est-à-dire sa valeur numérique, évaluée à l'aide de l'unité de force. — On représente géométriquement une force par une droite

partant du point d'application, dirigée dans le sens même de la force, et égale à autant de fois l'unité de longueur que la force contient de fois l'unité de force.

Lorsqu'une force F, appliquée en un point A d'un corps solide (*fig.* 6), le sollicite dans une direction AF, il est aisé de voir que l'on peut toujours supposer le point d'application de cette force transporté en tout autre point C ou B du corps, situé sur la même direction, et même en un point D extérieur au corps, pourvu que l'on suppose, en même temps, ce point *lié invariablement au premier*.

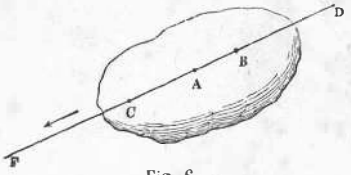


Fig. 6.

14. Composition des forces appliquées en un même point. — On démontre que, si plusieurs forces sont *appliquées en un même point*, elles peuvent toujours être remplacées par une force unique, ou *résultante*, produisant à elle seule le même effet que toutes les autres. — Nous nous contenterons d'énoncer, sans démonstration, les règles qui permettent d'obtenir cette résultante, dans les divers cas :

1° *Deux forces appliquées en un même point et dirigées dans le même sens, ont une résultante égale à leur somme, et dirigée dans le même sens que les forces proposées;*

2° *Deux forces appliquées en un même point, dans la même direction, mais en sens contraire, ont une résultante égale à leur différence, et dirigée dans le sens de la plus grande des deux forces proposées;*

3° *Deux forces* P, Q (*fig.* 7), *appliquées en un même point A, dans des directions différentes, ont une résultante représentée, pour sa grandeur, sa direction et son sens, par la diagonale AR du parallélogramme qui a pour côtés adjacents les deux forces proposées.*

Pour obtenir la résultante *d'un nombre quelconque de forces* appliquées en un même point, on composera d'abord deux de ces forces en une seule; puis, la résultante partielle ainsi obtenue, avec une troisième force; et ainsi de suite, jusqu'à ce qu'on ait réduit toutes les forces à une seule, qui sera la résultante du système tout entier.

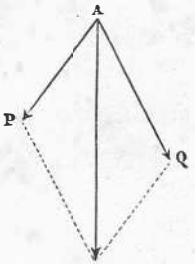


Fig. 7.

15. Composition des forces parallèles. — 1° *Deux forces parallèles et de même sens* P, Q (*fig.* 8), *appliquées en deux points A, B, d'un corps solide, ont une résultante* R *qui leur est parallèle, dirigée dans le même sens qu'elles, égale en grandeur à leur somme, et placée de manière que sa direction partage la droite* AB *en deux parties* AC, BC, *inversement proportionnelles aux intensités de ces forces* P *et* Q.

2° *Deux forces parallèles, de sens contraires et inégales*, P, Q (*fig.* 9), *appliquées en deux points* A, B *d'un corps solide, ont une résultante* R,

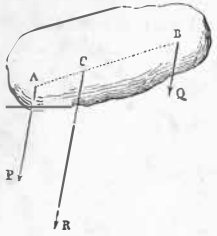


Fig. 8.

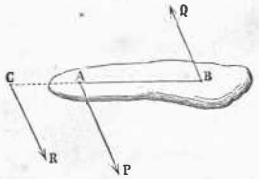


Fig. 9.

qui leur est parallèle, égale en grandeur à leur différence, dirigée dans le sens de la plus grande, et placée de manière que sa direction rencontre le prolongement de la droite AB *en un point* C, *tel que les distances* AC, BC *soient inversement proportionnelles aux intensités des forces* P *et* Q.

Pour composer ensemble un nombre quelconque de forces parallèles et dirigées *dans le même sens*, *p*, *p'*, *p''*,... (*fig.* 10), appliquées en divers point A, B, C... d'un corps solide, il suffira de composer deux de ces forces, *p*, *p'*, en une seule *r*; puis cette résultante partielle avec une troisième force *p''*; et ainsi de suite, jusqu'à ce qu'on ait réduit toutes les forces à une seule R, qui sera la résultante du système.

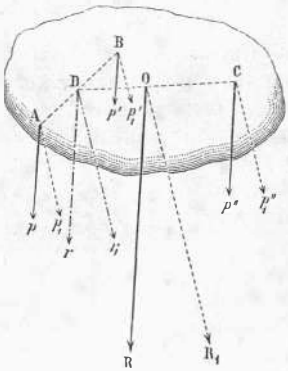


Fig. 10.

Si l'on a des forces parallèles, dirigées *les unes dans un sens, les autres en sens contraire*, on composera d'abord les premières en une résultante R, qui sera dirigée dans le même sens qu'elles; puis, les secondes, en une résultante R', qui sera dirigée en sens contraire de R. — Si ces deux forces R et R' sont inégales, elles auront une résultante égale à leur différence : ce sera la résultante du système proposé. — Si les forces R et R' sont égales et situées dans le prolongement l'une de l'autre, elles se feront équilibre, c'est-à-dire que la résultante de toutes les forces proposées sera nulle. — Enfin, si les forces R et R' sont égales et non situées dans le prolongement l'une de l'autre, elles constitueront un *couple*, tendant, comme on l'indiquera plus loin (17), à produire, non plus un mouvement de translation, mais un mouvement de rotation du corps auquel elles sont appliquées.

16. Centre des forces parallèles. — Soit un système de forces parallèles et dirigées dans le même sens, p, p', p'',... (*fig.* 10), appliquées en des points A, B, C.... d'un corps solide. Supposons qu'on change la direction commune de ces forces (comme l'indiquent les lignes marquées en traits discontinus), sans changer, ni leurs points d'application, ni leur parallélisme, ni leurs rapports d'intensité. On voit que le point D de la droite AB, par lequel passe la première résultante r, ne sera pas changé, puisque la position de ce point est déterminée par la relation $\frac{AD}{BD} = \frac{p'}{p}$, et ainsi de suite pour tous les points semblables, jusqu'au point O, par lequel passe toujours la résultante définitive de toutes les forces du système. — Ce point prend alors le nom de *centre des forces parallèles.*

On appelle donc *centre des forces parallèles*, pour un système déterminé de forces parallèles et de même sens, appliquées en des points déterminés d'un corps solide, *le point par lequel passe constamment la résultante de ce système, lorsqu'on change la direction commune des forces, sans changer leur parallélisme ni leurs rapports d'intensité.*

17. Couples. — On donne le nom de *couple*, à un système de deux forces parallèles, P, P′ (*fig.* 11), de sens contraires et *égales entre elles*, appliquées en deux points différents A, B d'un corps solide, et ayant une direction différente de celle de la droite AB qui joint leurs points d'application. Un pareil système ne peut être remplacé par une résultante; il tend à imprimer au corps un mouvement de rotation.

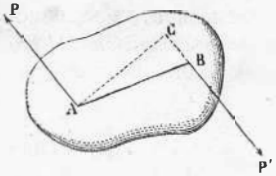


Fig. 11.

On appelle *bras de levier* d'un couple, la longueur AC de la perpendiculaire commune aux deux forces. — On appelle *moment* du couple, le produit du nombre qui exprime la mesure de l'une des forces P, par le nombre qui exprime la mesure du bras de levier AC.

On démontre qu'un couple doit être considéré comme ayant pour mesure *son moment.* — Il faut entendre par là que, si l'on prend pour unité de couple, le couple qui a pour force l'unité de force et pour bras de levier l'unité de longueur, le nombre qui exprime la mesure d'un couple quelconque est égal au produit du nombre qui exprime la mesure de la force, par le nombre qui exprime la mesure du bras de levier.

18. Composition des forces de directions quelconques, appliquées en des points différents d'un corps. — On démontre que des forces en nombre quelconque, appliquées en divers points d'un corps solide, suivant des directions quelconques, peuvent toujours se réduire *à un couple et à une force non située dans le plan du couple.*

C'est donc seulement dans certains cas particuliers, qu'un système de forces appliquées à un même corps peut se réduire, soit simplement à un couple, soit simplement à une force. — On a vu, par exemple, que des forces appliquées *en un même point* peuvent toujours être remplacées par une force unique (14). Il en est de même quand les forces, appliquées en des points différents d'un corps, ont des directions *concourantes*, c'est-à-dire quand leurs directions passent par un même point; en effet, on peut alors les considérer comme appliquées toutes à ce point de concours (13); par suite, on peut toujours les composer en une force unique, passant par ce point.

19. Équilibre. — Lorsque des forces, agissant simultanément sur un corps complètement libre, se neutralisent de manière à ne pouvoir pas produire de mouvement, on dit *qu'elles se font équilibre.* — Ainsi, deux forces égales et de sens contraires, appliquées en un même point, se font évidemment équilibre. — Il en est de même quand deux forces égales sont appliquées en deux points différents d'un corps solide, et agissent en sens contraire, dans la direction même de la droite qui joint ces deux points.

Quand un corps complètement libre est animé d'un mouvement *uniforme*, les forces qui agissent sur lui *se font équilibre;* car, si elles avaient une résultante, le mouvement serait varié.

On démontre que, toutes les fois que des forces se font équilibre sur un corps *complètement libre*, chacune d'elles peut être considérée comme égale et directement opposée à la résultante de toutes les autres.

TRAVAIL. — FORCE VIVE

20. Travail d'une force, pour un déplacement déterminé de son point d'application. — Lorsqu'un corps, soumis à l'action d'une force, éprouve un déplacement, on dit, en général, qu'il y a un *travail* effectué. — Pour évaluer la grandeur de cet effet, on doit tenir compte, non seulement de la grandeur de la force, mais aussi de la grandeur du déplacement de son point d'application. C'est ce que nous allons montrer par un exemple.

Considérons un corps ayant pour poids 1 kilogramme, et soulevons-le verticalement, d'un mouvement uniforme, à 1 mètre de hauteur; d'après ce qu'on vient de voir (19), la force musculaire nécessaire et suffisante est de 1 kilogramme (*); le travail effectué par cette force est *l'unité du travail* adopté en Mécanique; on l'appelle *kilogrammètre.* — Or, si l'on veut soulever verticalement, d'un mouvement uniforme,

(*) En réalité, pour mettre ce corps en mouvement, il faudra, pendant un intervalle de temps très court θ, lui appliquer une force musculaire un peu plus grande $1 + \varepsilon$. L'excès ε de cette force sur le poids, agissant de bas en haut pendant le

à 1 mètre de hauteur, un corps dont le poids est P kilogrammes, la force musculaire développée doit être P fois plus grande ; le travail effectué sera P kilogrammètres. — Enfin, si le même corps, pesant P kilogrammes, est soulevé à une hauteur de h mètres, le travail effectué sera encore h fois plus grand, c'est-à-dire qu'il aura pour mesure, en kilogrammètres, le produit des deux nombres P et h, et l'on aura, en représentant ce travail par W,

$$W = Ph.$$

21. Travail moteur. — Travail résistant. — Dans l'exemple que nous venons de choisir, la force musculaire, qui est dirigée dans le sens du déplacement, est dite *motrice*, et son travail est dit *moteur*. D'autre part, le poids du corps, qui est une force dirigée en sens contraire du déplacement, est une force *résistante ;* son travail est dit *résistant*.

Tant que le mouvement est uniforme, la force motrice et la force résistante sont égales ; les déplacements des points d'application étant les mêmes, le travail moteur est égal au travail résistant.

22. Travail d'une force, pour un déplacement dans une direction autre que celle de la force. — Si le point d'application A d'une force F (*fig.* 12) se déplace *dans une direction différente de celle de la force*, d'une longueur AB égale à e, on peut remplacer la force F par deux composantes, dont l'une F″ serait dirigée perpendiculairement au déplacement, et l'autre F′, dans la direction du déplacement lui-même. La première n'a évidemment aucun effet sur le mouvement effectué ; la force F′ est la seule dont on doive considérer l'action. On prend alors, comme travail de la force considérée, le travail W de la *composante efficace*. L'expression de ce travail est

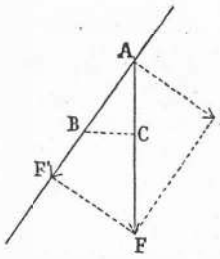


Fig. 12.

$$W = F'e,$$

et ce travail sera *moteur* ou *résistant* selon que la composante efficace sera dirigée dans le sens du mouvement ou en sens inverse.

temps θ, augmentera progressivement la vitesse, de zéro à v. — Au bout du temps θ, la force musculaire n'étant plus que 1 kilogramme, le mouvement deviendra uniforme et le corps conservera la vitesse v. — Un peu avant que le corps ait parcouru 1 mètre, pour le ramener au repos, on ne lui appliquera plus, pendant le même intervalle de temps θ, qu'une force musculaire un peu moindre $1 - \varepsilon$; l'excès ε du poids sur la force musculaire, agissant de haut en bas, diminuera progressivement la vitesse, jusqu'à la rendre nulle au bout du temps θ. — Quand on considère le corps comme constamment soumis à une force musculaire de 1 kilogramme, on néglige les petites variations que doit éprouver cette force, au début et à la fin du mouvement.

Dans le cas particulier où la force est *constante en grandeur et en direction*, on remplace cette expression du travail par une autre, qui va nous conduire à une conséquence remarquable.

Désignons par α l'angle BAF et par z la projection AC du déplacement AB sur la direction de la force; on a les égalités :

$$F' = F\cos\alpha \qquad e = \frac{z}{\cos\alpha};$$

si, dans l'expression du travail W, on remplace F′ et e par ces valeurs, l'expression de ce travail devient

$$W = Fz,$$

c'est-à-dire que ce travail a pour mesure *le produit de la force par la projection du déplacement sur la direction de la force.*

Ce résultat subsiste encore si le mobile se déplace suivant une ligne brisée ABCD (*fig.* 13). En projetant sur la direction AF les déplacements rectilignes successifs, on voit que les travaux successifs de la force F seront :

$$F \times AB', \qquad F \times B'C', \qquad F \times C'D';$$

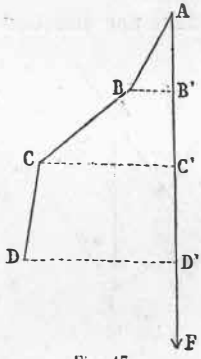


Fig. 13.

le travail total sera donc $F \times AD'$. — Il serait encore le même si le mobile suivait *une autre ligne brisée quelconque* (ou une ligne *courbe*), partant du point A et se terminant à un point quelconque pris sur la droite DD′.

Lorsque *plusieurs forces* F, F_1, F_2... agissent simultanément sur un mobile, et lorsqu'elles ont une résultante, on démontre en Mécanique que, pour un déplacement donné, le travail de la résultante est égal à la somme algébrique des travaux des composantes F, F_1, F_2,... Dans cette somme algébrique, le travail d'une force est compté positivement ou négativement, selon qu'il est moteur ou résistant.

23 Force vive. — Principe des forces vives. — On appelle *force vive* d'un point matériel, à un instant déterminé, le demi-produit de sa masse par le carré de sa vitesse, $\frac{1}{2}mv^2$. Cette expression est toujours positive, quel que soit le signe de la vitesse v.

Soit un point de masse m, animé d'une vitesse initiale v_0; sa force vive initiale est $\frac{1}{2}mv_0^2$. Faisons agir sur ce point, dans le sens de son mouvement, une force constante F; le mouvement devenant uniformément accéléré (9), la vitesse au bout du temps t est :

$$v = v_0 + \gamma t;$$

d'où l'on tire :

$$v - v_0 = \gamma t, \qquad v + v_0 = 2v_0 + \gamma t,$$

$$v^2 - v_0^2 = 2\gamma \left[v_0 t + \frac{\gamma t^2}{2} \right] = 2\gamma e.$$

Par suite,

$$\frac{1}{2} mv^2 - \frac{1}{2} mv_0^2 = m\gamma e = Fe.$$

L'accroissement de la force vive est donc égal au produit Fe, qui mesure le travail moteur de la force pendant l'intervalle de temps considéré, c'est-à-dire le travail *reçu* par le point matériel qui obéit à l'action de la force.

Si la force F était dirigée en sens inverse du mouvement du mobile, le mouvement serait uniformément retardé, la vitesse v serait plus petite que la vitesse initiale, et la diminution de la force vive serait égale au travail résistant de la force pendant l'intervalle de temps considéré, c'est-à-dire au travail *produit* par le point matériel qui s'est déplacé malgré la force.

On démontre, en Mécanique, le théorème général suivant : Quand un système solide, formé d'un nombre quelconque de points matériels, est animé d'un mouvement quelconque, *pendant un intervalle de temps déterminé, la somme algébrique des travaux de toutes les forces appliquées aux différents points du système est égale, en grandeur et en signe, à la variation de la somme des forces vives de tous les points pendant ce même temps.* — C'est l'énoncé connu sous le nom de *principe des forces vives*, principe dont nous admettrons la généralité.

24. Transmission du travail dans les machines. — Une *machine simple* (levier, treuil) est un corps solide, assujetti à une liaison déterminée, et auquel sont appliquées deux forces non directement opposées, la *puissance* et la *résistance*.

Dans la plupart des cas, la machine sert à utiliser le travail qui correspond à un déplacement du point d'application de la puissance, pour produire un déplacement du point d'application de la résistance. Les travaux correspondant à ces deux déplacements sont toujours *égaux en valeur absolue* : c'est ce que nous allons montrer, en prenant comme exemple le levier.

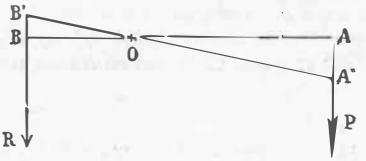


Fig. 14.

Le *levier* est une barre rigide AB, mobile autour d'un point O (*fig.* 14) ; la fixité du point O constitue la *liaison*. — La résistance appliquée au point B est, par exemple, le poids d'un corps pesant, que l'on veut soulever au moyen d'une force musculaire, la puissance, appliquée au point A. Supposons le levier *au repos* : la résultante des deux forces P et R doit passer par le point d'appui O ; elle a pour effet d'appuyer le levier sur son point fixe, et développe une force égale et directement opposée, la

réaction du point d'appui; c'est la force de liaison. On doit donc avoir (15) :

$$\frac{P}{R} = \frac{OB}{OA}.$$

L'équilibre subsiste encore quand la machine est animée *d'un mouvement uniforme* (19). Au bout d'un intervalle de temps déterminé, le levier occupera la position A'B'; la similitude des triangles AOA', BOB', donne la relation :

$$\frac{OB}{OA} = \frac{BB'}{AA'},$$

qui, combinée avec la relation précédente, donne :

$$P \times AA' = R \times BB'.$$

— Le travail moteur de la puissance $P \times AA'$ est donc égal au travail résistant $R \times BB'$. En d'autres termes, la machine produit en B un travail égal à celui qu'elle reçoit en A. — Il en est ainsi dans toute machine en mouvement uniforme; nous en rencontrerons d'autres exemples.

L'égalité du travail moteur et du travail résistant, dans une machine en mouvement uniforme, est d'ailleurs une conséquence du principe des forces vives. En effet, les différents points qui constituent la machine ont une force vive constante; la somme algébrique des travaux des forces est donc nulle. D'autre part, le travail de la force de liaison est nul, puisque son point d'application est fixe. Donc le travail positif de la puissance est égal, en valeur absolue, au travail négatif de la résistance.

Une *machine composée* est un système dont les divers organes sont des machines simples; telle est la machine à vapeur. — Généralement, le mouvement est périodique; c'est-à-dire que, à des intervalles de temps réguliers, appelés périodes, les différents points de la machine reprennent les mêmes positions relatives et sont animés des mêmes vitesses. Au commencement et à la fin de chaque période, la force vive totale reprend donc la même valeur; la somme algébrique des travaux des forces est nulle, c'est-à-dire que le travail moteur et le travail résistant sont égaux en valeur absolue, pendant la durée de chaque période. Dans la première partie de la période, le travail moteur est plus grand que le travail résistant, la force vive de la machine augmente; à la fin de la période, la force vive diminue, le travail résistant est supérieur au travail moteur.

Une machine, simple ou composée, *ne crée donc pas de travail*. Dans la plupart des cas, l'avantage des machines est de permettre de vaincre, avec une force motrice relativement petite, une résistance considérable; mais ce qu'on gagne en force, on le perd en chemin parcouru.

II. — CONSTITUTION DES CORPS. — ÉNERGIE

25 Divisibilité des corps. — Atomes. — Molécules. — Les corps, en général, peuvent être divisés en parties de plus en plus petites, sans perdre les propriétés qui les caractérisent. — Cependant, bien que l'on puisse diviser la matière en parties d'une petitesse

extrême, l'étude des propriétés des corps a conduit à admettre que chacun d'eux est formé *d'atomes* (ἀ négatif, τεμνω couper), c'est-à-dire de particules insécables, disposées par groupes, chaque groupe constituant une *molécule* (diminutif de *moles*, masse) (*).

Parmi les corps connus, il en est qu'on n'a jamais pu décomposer en éléments différents : tels sont l'hydrogène, l'oxygène, le fer, etc.. ; on les nomme *corps simples;* leurs molécules sont formées d'atomes tous identiques. — Les *corps composés* sont ceux dans lesquels on peut mettre en évidence la présence de plusieurs substances différentes. Par exemple, en soumettant l'eau à l'action d'un courant électrique, on la décompose en deux gaz, l'oxygène et l'hydrogène, dont les propriétés n'ont plus rien de commun avec celles de l'eau. Il est naturel de considérer les molécules d'eau comme formées d'atomes d'hydrogène et d'atomes d'oxygène.

On admet que les molécules ne sont pas en contact les unes avec les autres, mais qu'elles sont séparées par des intervalles dont les dimensions sont comparables à celles des molécules elles-mêmes. — Cette hypothèse permet, par exemple, de se rendre compte des propriétés suivantes : 1° tous les corps éprouvent une *diminution de volume* quand on exerce sur eux une *pression* suffisante; 2° tous les corps éprouvent une *variation* de *volume* quand on fait varier leur *température*. Ces variations de volumes s'expliquent par les variations de grandeur des intervalles qui existent entre leurs molécules.

On peut assimiler les molécules d'un corps à des points matériels, exerçant les uns sur les autres des actions mutuelles. On admet généralement que, entre deux points quelconques, s'exercent deux forces dirigées suivant la droite qui les joint, égales, de sens contraires, et dont la grandeur dépend de la distance des points et de la nature des molécules. C'est ce qu'on appelle les *forces intérieures* du corps; les autres forces qui peuvent agir sur le corps (poids du corps, pressions, tractions, etc.,) sont appelées des *forces extérieures*.

26. États physiques des corps. — Les divers états physiques sous lesquels les corps se présentent à nous peuvent se rapporter à trois types : *l'état solide*, *l'état liquide* et *l'état gazeux*.

1° *État solide.* — Nous appellerons *état solide*, celui d'un corps dont *le volume et la forme demeureraient constants*, quelque grandes que fussent les forces extérieures qui lui seraient appliquées.

Les corps solides sur lesquels peuvent porter nos expériences ne sont

(*) On doit se représenter ces molécules comme ayant des dimensions tellement petites, qu'elles échapperont toujours à nos regards, même avec le secours des microscopes les plus puissants. Le physicien anglais William Thomson a été conduit par le calcul à cette conclusion, que si l'on pouvait voir une goutte d'eau avec un grossissement tel, qu'elle apparût avec la grosseur de la Terre, ses molécules n'acquerraient encore que des dimensions comparables à celles de grains de sable.

jamais rigoureusement conformes à cette définition ; une tige d'acier, soumise à des actions mécaniques, comme une pression ou une traction énergique, éprouve une déformation plus ou moins sensible. Mais elle revient à sa forme primitive dès que ces actions sont supprimées : c'est la propriété qu'on désigne sous le nom *d'élasticité*. — L'élasticité elle-même se manifeste chez les divers corps d'une manière très inégale : le plomb en est à peu près dénué.

2° *État liquide*. — Nous appellerons *état liquide*, celui d'un corps *dont le volume demeurerait constant*, quelles que fussent les forces extérieures qui lui seraient appliquées, mais *dont la forme dépendrait essentiellement de celle des parois solides avec lesquelles il serait en contact*.

Des expériences précises prouvent que les liquides sur lesquels nous pouvons opérer éprouvent des variations de volume, très petites d'ailleurs et toujours temporaires, quand on les soumet à des pressions considérables. Sous le rapport de l'invariabilité du volume, ils ne satisfont donc pas rigoureusement à la définition précédente. — Mais ils ont une forme essentiellement variable, comme l'indique la définition. La mobilité de leurs molécules est telle, qu'il suffit de faire passer une masse d'eau d'un vase dans un autre, pour la voir prendre la forme du second vase, sous la seule action de son poids (*).

3° *État gazeux*. — On appelle *corps gazeux*, des corps qui ont, comme les liquides, la propriété d'avoir une forme essentiellement variable, mais qui se distinguent des liquides en ce qu'ils tendent toujours à occuper *le plus grand volume possible*. — En d'autres termes, quand une masse de gaz est introduite dans une enveloppe quelconque, elle se répand dans tout l'espace qui lui est offert, et continue encore à exercer sur les parois une pression tendant à les écarter. La force qui sollicite alors, de dedans en dehors, l'unité de surface de la paroi supposée plane, est ce qu'on nomme la *force élastique* du gaz.

Pour mettre en évidence la force élastique des gaz, prenons une vessie presque dégonflée, c'est-à-dire contenant peu d'air, et ficelons-en solide-

(*) La mobilité des molécules n'appartient cependant pas non plus, au même degré, aux divers liquides que nous pouvons soumettre à l'expérience. — Si l'on prend des flacons partiellement remplis d'eau ou d'éther, qu'on les agite et qu'on les abandonne ensuite au repos, on voit disparaître presque instantanément l'écume qui avait été produite par l'interposition de bulles d'air dans la masse : l'écume persiste plus longtemps avec l'huile, l'eau de savon, à cause de la résistance qu'éprouvent les molécules pour reprendre les positions que tend à leur donner la pesanteur. Cette résistance au mouvement, qu'on désigne sous le nom de *viscosité*, se manifeste dans tous les liquides, à un degré plus ou moins marqué.

On peut remarquer enfin que les diverses substances présentent une série d'intermédiaires, entre les corps qui se rapprochent de l'état liquide idéal et ceux qui sont voisins de l'état solide parfait : les corps *mous*, comme le potassium, le sodium, le phosphore, que l'on classe généralement parmi les corps solides, se rapprochent des corps liquides en ce qu'il suffit de forces très faibles pour leur faire subir des déformations.

ment l'ouverture. Il semble que l'air enfermé dans la vessie n'exerce aucune pression sur ses parois; mais si l'on place la vessie sous une cloche reposant sur le plateau de la machine pneumatique (*fig.* 15), et qu'on enlève progressivement l'air de la cloche, on voit la vessie se distendre, jusqu'à remplir presque entièrement la cloche (*fig.* 16). Donc,

Fig. 15.

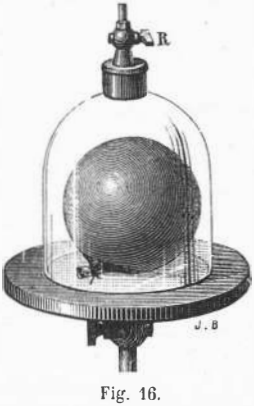


Fig. 16.

si elle ne se distendait pas d'abord, c'est que la force élastique de l'air qu'elle contient était équilibrée par la pression de l'air environnant. — D'ailleurs, si l'on ouvre le robinet R de la cloche, de manière à laisser rentrer l'air autour de la vessie, on la voit s'affaisser de nouveau.

Cette expérience montre donc, non seulement que l'air possède une *force élastique*, mais aussi qu'il est *compressible*, c'est-à-dire que son volume diminue quand la pression qui s'exerce sur lui vient à augmenter. — C'est ce que nous allons constater également dans l'expérience suivante.

Fig. 17. — Briquet à air.

27. Expérience du briquet à air. — La force élastique d'un gaz augmente quand on diminue son volume. — Le *briquet à air* se compose d'un tube de verre épais (*fig.* 17), fermé à l'une de ses extrémités, et dans lequel on introduit un piston garni de cuir et bien graissé. On enferme ainsi, dans le tube, une certaine quantité d'air. — En appuyant, avec la main, sur la tige du piston, on arrive à le faire pénétrer dans le tube jusqu'à une certaine profondeur, ce qui prouve que l'air est *compressible*. — Mais, en enfonçant ainsi progressivement le piston, on éprouve une résis-

tance croissante, et bientôt même il devient difficile de pousser le piston plus loin. Donc la *force élastique* de l'air qui, pour chaque position du piston, fait équilibre à la pression exercée sur lui, devient *de plus en plus grande*, à mesure que le volume de l'air devient *plus petit* (*).

28. Densité, poids spécifique d'un corps solide ou liquide. — Pour tout corps homogène, solide ou liquide, de nature déterminée, la masse m est proportionnelle au volume v. La *masse de l'unité de volume*, $\frac{m}{v}$, est ce qu'on nomme la *densité* ou la *masse spécifique* du corps ; c'est une quantité caractéristique de la nature même du corps.

On appelle *poids spécifique* d'un corps solide ou liquide, le *poids de l'unité de volume* de ce corps. En un point de la Terre où l'accélération de la chute des corps est g, si la masse de l'unité de volume d'un corps est d, son poids spécifique est dg.

29. De l'énergie. — On appelle *énergie d'un corps*, la quantité de travail que ce corps est capable de produire.

Nous ne savons pas, en général, mesurer l'énergie d'un corps, ainsi définie ; mais on peut, dans la plupart des cas, évaluer la *variation d'énergie* qu'il éprouve, dans des conditions déterminées. — C'est ce que nous allons faire comprendre sur quelques exemples simples, qui nous permettront de montrer, en même temps, que l'énergie peut être de deux espèces différentes.

30. Énergie de mouvement, ou énergie actuelle. — Considérons, par exemple, ce qui se passe quand un marteau, de masse m, lancé verticalement de bas en haut, avec une vitesse v, rencontre un corps pesant suspendu à l'extrémité d'un long fil. Au moment du choc, le marteau étant brusquement arrêté, le corps pesant, de poids p, s'élève à une hauteur h : c'est l'effet qu'aurait pu produire une force égale à p, appliquée verticalement au corps, de bas en haut, et le faisant parvenir à cette même hauteur h. Donc, s'il n'y a aucun autre effet produit, à la disparition de la force vive de translation du marteau $\frac{1}{2}mv^2$, correspond la production d'un travail ph, sur le corps qu'il a rencontré : d'après le principe des forces vives (23), le travail produit est égal à la force vive qui a disparu. — Dans tous les cas de ce genre, on peut dire qu'un corps en mouvement possède, par cela même, une certaine quantité d'énergie, égale à sa force vive, et qui prendra le nom d'*énergie de mouvement*. — On l'appelle plus ordinairement *énergie actuelle*.

D'une manière générale, pour un corps *non déformable*, la force vive,

(*) Cet appareil a reçu le nom de *briquet à air*, à cause de la chaleur que dégage la compression de l'air. Lorsqu'on enfonce brusquement la tige, l'élévation de température peut devenir assez grande pour allumer un morceau d'amadou fixé à la partie inférieure du piston.

ou énergie actuelle, ne saurait diminuer ou augmenter, qu'autant que ce corps produit ou reçoit un travail extérieur.

31. Énergie de position, ou énergie potentielle. — Considérons maintenant un corps solide *déformable*, tel qu'un ressort d'acier, amené à un état de tension déterminé, et fixé invariablement à l'une de ses extrémités. Si on l'abandonne à lui-même, il est capable, en se détendant, d'imprimer un mouvement à un corps mis en contact avec son extrémité libre, c'est-à-dire de produire un travail. Or, une fois cet effet produit, et le ressort revenu à l'état de repos, la force vive de chacun de ses points est redevenue nulle comme auparavant : au travail effectué par le ressort, ne correspond donc aucune diminution de son énergie actuelle. Mais la détente du ressort constitue une *déformation*, après laquelle les molécules occupent d'autres positions relatives : puisqu'il y a eu accomplissement d'un travail extérieur *résistant*, sans diminution de force vive, c'est que les forces *intérieures* (25) ont agi pendant la détente comme *motrices*. Cette énergie que possède un ressort tendu, et qui disparaît en totalité ou en partie après une détente totale ou partielle, dépend évidemment de la position relative des molécules : on lui donne, pour cette raison, le nom d'*énergie de position*. — On l'appelle aussi *énergie potentielle* (énergie en puissance).

Remarque. — En général, on reconnaîtra que, dans la déformation d'un corps, il y a *diminution d'énergie potentielle*, lorsque les forces intérieures agiront comme forces *motrices*. — Inversement, dans toute déformation, il y aura *accroissement d'énergie potentielle*, lorsque les forces intérieures agiront comme forces *résistantes*.

32. — Énergie totale d'un corps. — Principe de la conservation de l'énergie. — D'après ce qu'on vient de voir, un corps peut posséder de l'énergie de deux espèces. L'*énergie totale* d'un corps est la somme de son énergie actuelle et de son énergie potentielle.

Si un corps, ou un système de corps, est soustrait à toute action extérieure (chaleur, électricité, lumière,) et si, de plus, aucune force extérieure n'agit sur lui, *son énergie totale demeure constante.* — Ce principe, absolument général, qui domine l'étude de la physique, est une conséquence immédiate du théorème des forces vives (25). En effet, l'énergie actuelle ne peut augmenter ou diminuer, que si les forces intérieures, les seules qui puissent agir, ont donné lieu à un travail moteur ou résistant; mais alors l'énergie potentielle a diminué ou augmenté de la même quantité (31, *Rem.*).

Soit, par exemple, un corps de masse m, suspendu par un fil au-dessus du sol : il constitue, avec la Terre, un système dans lequel le poids P ou mg du corps doit être considéré comme une force intérieure. Le corps étant en repos, la force vive ou énergie actuelle est nulle. Si l'on vient à couper le fil, le corps tombe, et parcourt un espace e; le travail moteur de la force intérieure, c'est-à-dire la diminution de l'énergie

potentielle (31, *Rem.*) est Pe ou mge; mais, d'autre part, la vitesse étant devenue $v = \sqrt{2ge}$, l'énergie actuelle s'est accrue de $\frac{1}{2}\,mv^2$ ou mge; l'énergie totale est donc demeurée constante. Après que le corps a rencontré le sol, si le sol est parfaitement rigide et que le corps soit parfaitement élastique, il rebondit à sa hauteur primitive : alors, c'est l'énergie potentielle qui augmente, tandis que l'énergie actuelle diminue, etc....

Il est cependant des cas où ce principe semble en défaut. Quand une masse de plomb tombe sur le sol, d'une certaine hauteur, sa force vive s'anéantit sans que le corps rebondisse, et par conséquent sans qu'il y ait accroissement d'énergie potentielle; mais, dans ce cas, le plomb s'échauffe, c'est-à-dire qu'*il apparaît de la chaleur*. Nous verrons, par la suite, que ce n'est là qu'une manifestation particulière de l'énergie qui semble avoir disparu.

Une analyse attentive des phénomènes conduit à considérer la chaleur, l'électricité, la lumière, comme n'étant que des modes divers de l'énergie. C'est là une des conquêtes les plus remarquables de la science moderne.

L'énergie ne disparaît donc jamais : elle se transforme, mais elle est indestructible comme la matière.

On peut dire que le but de la Chimie est l'étude des modifications de la matière. — Le but de la Physique est l'étude de l'énergie et des phénomènes qui accompagnent ses diverses transformations.

III. — SYSTÈME D'UNITÉS C.G.S.

33. Du choix des unités. — Dans tout système de mesures, on doit toujours fixer arbitrairement trois unités *fondamentales*, qui correspondent à trois grandeurs de natures différentes. Conformément aux conventions usitées en Mécanique, nous avons pris jusqu'ici, comme unités fondamentales : 1° l'unité de *longueur* (mètre), 2° l'unité de *temps* (seconde), 3° l'unité de *force* (poids du kilogramme).

Ces trois unités fondamentales une fois choisies, toutes les autres unités (*unitées dérivées*) s'en déduisent, par des formules de définition. Par exemple, l'unité de masse et l'unité de travail sont définies par les formules précédemment établies (11 et 22) :

$$m = \frac{F}{\gamma} = \frac{P}{g}, \qquad W = Fe,$$

ce qui revient à dire que l'*unité de masse* est la masse d'un corps qui, à Paris, pèse $9^{kil},81$; que l'*unité de travail* est le travail qu'il faut effectuer pour soulever un poids de 1 kilogramme à 1 mètre de hauteur. Cette unité de travail est aussi l'*unité d'énergie*.

Mais ce système d'unités présente l'inconvénient de faire dépendre l'unité de masse et diverses autres unités dérivées, de l'accélération de la chute des corps, laquelle n'est pas la même en tous les points du globe. Aussi lui a-t-on substitué un système différent, dont les bases, posées par Gauss, ont été adoptées par les physiciens réunis en congrès à Paris, en 1881.

34. Unités fondamentales C.G.S. — Dans ce nouveau système, les trois unités fondamentales ne sont plus les unités de longueur, de force et de temps, mais les unités de *longueur*, de *masse* et de *temps* (l'unité de force devient une unité dérivée).

L'unité de longueur est le *centimètre*.

L'unité de masse est la masse du *gramme*, c'est-à-dire la masse d'un centimètre cube d'eau distillée, à la température de 4°. Cette unité prend le nom de *gramme-masse*.

L'unité de temps est la *seconde* de temps moyen.

Le système constitué par cet ensemble d'unités *fondamentales* et par les unités *dérivées* a reçu le nomde système C.G.S. (centimètre, gramme, seconde).

35. Unités dérivées C.G.S. — D'après la formule de définition, $v = \frac{e}{t}$, l'*unité de vitesse* C.G.S. est la vitesse d'un mobile qui parcourt, d'un mouvement uniforme, un centimètre en une seconde.

L'*unité d'accélération* C.G.S. est l'accélération d'un mobile qui se meut d'un mouvement uniformément accéléré, et dont la vitesse varie d'une unité pendant une seconde (4). Dans le système C.G.S., l'accélération de la chute des corps à Paris n'est plus mesurée par le nombre 9,81, mais par un nombre cent fois plus grand, 981.

L'*unité de force* est définie (12) par la relation $F = m\gamma$. Si l'on pose $m = 1$ et $\gamma = 1$, on aura $F = 1$. L'unité de force, appelée *dyne* (du grec δύναμις, force), est donc la force qui imprimerait à l'unité de masse une accélération d'une unité.

Pour avoir une idée de la grandeur de la dyne, calculons la valeur F de l'ancienne unité de force (le poids du kilogramme, à Paris) exprimée en dynes. — Cette force F, appliquée à une masse égale à 1000 grammes-masses, lui imprime une accélération égale à 981. En appliquant la formule $F = m\gamma$, on a $F = 1000 \times 981$ dynes. — Le nombre 981 étant approximativement égal à 1000, on voit que le poids d'un kilogramme représente à peu près un million de dynes. En d'autres termes, la dyne équivaut sensiblement au poids d'un millionième de kilogramme, ou au *poids de 1 milligramme*. — Exactement, le poids du gramme vaut 981 dynes.

L'*unité de travail* ou *d'énergie* est définie (22) par la relation $W = Fe$. Si l'on pose $F = 1$, et $e = 1$, on aura $W = 1$. L'unité d'énergie, appelée *erg* (du grec ἔργον, travail), est le travail accompli

par une force d'une dyne qui déplace son point d'application de 1 centimètre.

La dyne étant à peu près équivalente au poids de 1 milligramme, lorsque un milligramme tombe de 1 centimètre de hauteur, le travail est à peu près de 1 erg; quand on soulève un milligramme à un centimètre de hauteur, on augmente son énergie de 1 erg.

Il est facile de calculer la valeur du kilogrammètre au moyen de cette nouvelle unité. — Dans la formule $W = Fe$, faisons F égal à 1 kilogramme, c'est-à-dire à 1000×981 dynes, et faisons e égal à 1 mètre, c'est-à-dire 100 centimètres : nous aurons : $W = 1000 \times 981 \times 100$ ergs; le kilogrammètre vaut donc sensiblement 10^8 ergs.

Pour définir l'*unité de pression*, il suffit de considérer une disposition semblable à celle du briquet à air (*fig.* 17); lorsque le piston est arrivé à une position d'équilibre, la force F, qui s'exerce sur lui de haut en bas, est équilibrée par la force élastique du gaz. Si S est la surface du piston, la force exercée *par unité de surface* est exprimée par le quotient $\frac{F}{S}$: c'est ce quotient qui définit la pression extérieure (par unité de surface); il représente également la force élastique du gaz. D'après cette formule de définition, dans le système C.G.S., l'*unité de pression* ou *de force élastique* est une pression telle que chaque centimètre carré soit sollicité par une force d'une dyne.

L'*unité de densité* est fixée par la définition qui a été donnée (28) de la densité $d = \frac{m}{v}$. Si l'on fait $m = 1$ et $v = 1$, on a $d = 1$. Dans le système C.G.S., l'*unité de densité* est donc la densité d'un corps tel que, sous le volume de 1 centimètre cube, la masse soit de 1 gramme. (On voit que, d'après la définition du gramme-masse (34), la densité de l'eau, à 4°, est précisément l'unité.)

36. Unités pratiques du système C.G.S. — Dans les usages pratiques, certaines des unités qui viennent d'être définies (*unités absolues*) étant très petites par rapport aux grandeurs de même espèce qu'elles doivent servir à mesurer, on serait conduit à exprimer les résultats de ces mesures par des nombres extrêmement grands. — On a trouvé plus commode de substituer, dans certains cas, à l'unité absolue C.G.S., une *unité pratique*, égale à l'unité absolue multipliée par une puissance de 10. Cette puissance a d'ailleurs pu être choisie parfois de telle façon, que l'unité pratique ainsi obtenue se rapprochât de l'ancienne unité adoptée en Mécanique : on y trouve alors l'avantage que les déterminations numériques anciennement effectuées peuvent être conservées comme des évaluations approximatives en unités C.G.S. Dans tous les cas d'ailleurs, les résultats exacts pourront s'obtenir en multipliant par un facteur numérique constant. — Nous indiquerons seulement ici quelques-unes de ces unités pratiques, nous réservant d'indiquer les autres quand nous aurons à en faire usage.

L'unité absolue de force, la *dyne*, équivaut à peu près (35) au poids d'un milligramme, ou d'un millionième de kilogramme. Dans la mesure de la plupart des forces appliquées à nos machines, l'emploi de cette unité conduirait à des nombres extrêmement grands, incommodes à introduire dans les calculs. — Si, au lieu de la dyne, on prend comme *unité pratique* une force un million de fois plus grande ou égale à 1 *dyne* $\times$ 10^6, la *mégadyne*, on aura une unité voisine du poids du kilogramme. Les nombres, un million de fois plus petits, qui représenteront les mesures des forces en mégadynes, seront peu différents des anciennes mesures en kilogrammes (*).

L'unité absolue de travail ou d'énergie, l'*erg*, équivaut à peu près (35) à la cent-millionième partie du kilogrammètre : pour l'étude des moteurs industriels, par exemple, c'est une unité beaucoup trop petite. — Dans la pratique, on s'est accordé pour lui substituer une unité dix millions de fois plus grande, égale à 1 *erg* $\times$ 10^7, qui a reçu le nom de *joule* : c'est à peu près la dixième partie du kilogrammètre. Par suite, le nombre qui exprimera la mesure d'un travail, en joules, sera à peu près dix fois plus grand que la mesure en kilogrammètres (**).

IV. — INSTRUMENTS DE MESURE

37. Mesure des longueurs. — Vernier. — Pour mesurer une longueur rectiligne, le procédé général consiste à porter sur cette longueur, autant de fois que possible, le mètre et ses subdivisions. La plus petite subdivision usitée est le millimètre, en raison de la nécessité de donner aux traits une épaisseur qui les rende visibles à l'œil nu. Or il arrive, le plus souvent, que la longueur à mesurer contient, avec un nombre entier de millimètres, une fraction de millimètre, que ce mode de division ne permet pas d'évaluer avec exactitude. L'emploi du vernier est destiné à pousser plus loin l'approximation, sans modifier les subdivisions de la règle.

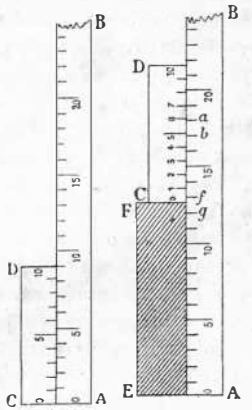


Fig. 18. Vernier. Fig. 19.

Imaginons deux règles (*fig.* 18), l'une AB divisée en millimètres, l'autre CD plus courte et mobile le long de la première. Supposons que la longueur de CD soit égale à celle de 9 divisions de AB, et qu'elle

(*) Plus exactement, si la mesure d'une force en kilogrammes est exprimée par le nombre N, la valeur de cette force en mégadynes sera N $\times$ 0,981.

(**) Plus exactement, si la mesure en kilogrammètres est exprimée par le nombre N, la mesure en joules sera N $\times$ 9,81.

soit partagée en 10 parties égales, dont chacune vaut ainsi $\frac{9}{10}$ de millimètre ; cette petite règle est le *vernier*.

Soit EF (*fig.* 19) la longueur qu'on veut mesurer, à partir de l'origine des divisions de la grande règle ; l'extrémité F tombant, par exemple, entre les deux traits *g* et *f*, la longueur EF est égale ici à 12 millimètres, plus une fraction additionnelle qu'il s'agit d'évaluer. Or le zéro du vernier étant amené à l'extrémité F, comme le représente la figure, cherchons, parmi les traits du vernier, quel est celui qui se trouve en regard de l'un des traits de la règle : supposons, par exemple, que ce soit le septième. Puisqu'une division de AB équivaut à 1 millimètre, et une division de CD à $0^{mm},9$, il est clair que la distance des traits marqués 6 et *a* est $0^{mm},1$; celle des traits marqués 5 et *b* est $0^{mm},2$.. ; enfin la distance du zéro du vernier au trait *g* est de $0^{mm},7$. En général, le numéro d'ordre de la division du *vernier* qui coïncide avec un trait de la grande règle, donne la fraction additionnelle, en *dixièmes* de millimètre (*).

38. Cathétomètre. — Le *cathétomètre*, imaginé par Dulong et Petit, est destiné à mesurer la distance verticale de deux points, c'est-à-dire la distance des plans horizontaux qui passent par ces points.

Le cathétomètre (*fig.* 20 *et* 21) se compose essentiellement d'une lunette horizontale AB mobile le long d'une règle verticale divisée MN, laquelle tourne librement elle-même autour d'un axe vertical. — Les figures 20 et 21 montrent deux vues d'un même instrument, prises de deux positions opposées : la colonne verticale MN a ici la forme d'un prisme triangulaire, qui porte une division en millimètres sur l'une de ses faces (*fig.* 21), et qui est traversé suivant son axe par une barre métallique : c'est sur cette barre que se fait la rotation, autour de la pointe de la vis R. — La lunette est portée par un chariot formé de deux pièces P, Q, qui sont liées entre elles par une vis *g* (*fig.* 21) : en *r*, cette vis n'est qu'assujettie dans une sorte de collier ; en *s*, le filet de la vis tourne dans un écrou fixé à la pièce P. La pièce inférieure Q porte une vis de pression F (*fig.* 20) qui permet de la fixer solidement sur la colonne, et alors la vis *g* peut faire monter ou descendre la pièce P, de quantités aussi petites qu'on veut. Un vernier est tracé sur l'arête de la fenêtre *mn* (*fig.* 21). — A l'intérieur de la lunette, au foyer de l'objectif, c'est-à-dire au point où viennent se former nettement les images des objets extérieurs, on a tendu en croix deux fils très fins, qui forment le réticule. — Trois vis calantes permettent de faire en sorte que la colonne soit bien verticale. La vis *e*, en faisant basculer la

(*) Si l'on prenait un vernier dont la longueur totale fût égale à 49 millimètres, et que l'on divisât cette longueur en 50 parties égales, on pourrait de même effectuer des mesures en *cinquantièmes* de millimètre. Il n'y a d'ailleurs aucun avantage à dépasser cette limite, parce que eu égard à la largeur des traits eux-mêmes, les coïncidences paraîtraient réalisées simultanément pour plusieurs traits consécutifs du vernier et de la règle.

pièce *ab*, permet d'établir l'horizontalité de l'axe de la lunette, qu'on apprécie d'ailleurs avec le niveau à bulle d'air *cd*. — Avant de faire une expérience, on commence par assurer toutes ces conditions, c'est-à-dire par *régler* l'instrument, opération assez délicate et dans le détail de laquelle nous n'entrerons pas.

Pour mesurer la distance verticale de deux points, on installe le

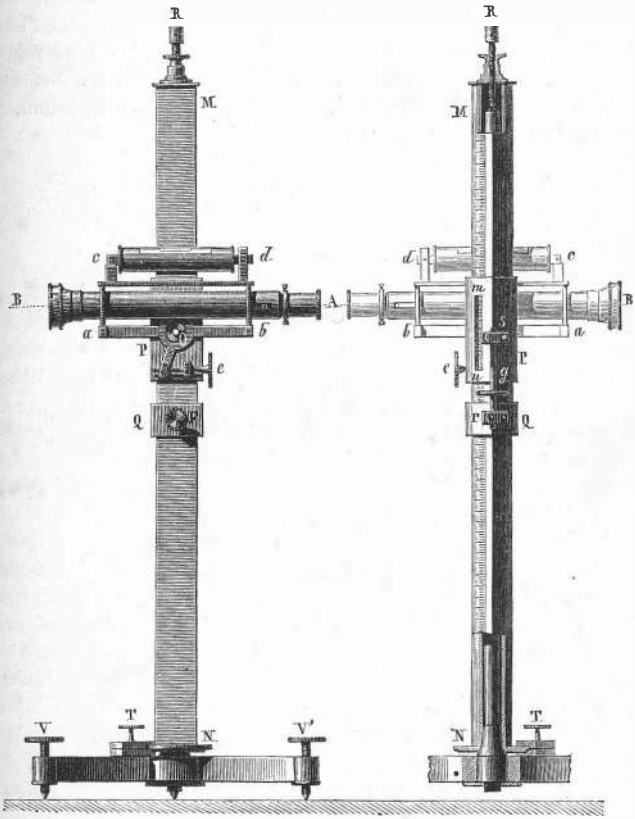


Fig. 20. Fig. 21.

Cathétomètre.

cathétomètre à une distance telle que ces deux points puissent être distingués nettement dans la lunette, et l'on règle l'instrument. — On place alors la lunette de manière que le *croisé* des fils du réticule vienne coïncider exactement avec l'image du premier point; pour cela, on transporte le chariot le long de la règle jusqu'à ce que la lunette

soit arrivée à une position approchée; on fixe ensuite la pièce Q, et au moyen de la vis *g* on fait monter ou descendre la pièce P jusqu'à ce que la coïncidence paraisse rigoureusement établie. On note alors la division de la règle qui est immédiatement au-dessous du zéro du vernier *mn* et le numéro du vernier qui coïncide avec une division de la règle. Supposons par exemple que, le vernier étant au cinquantième, on ait lu 37 millimètres sur la règle, et le numéro 43 du vernier. — On amène ensuite de la même manière le réticule à coïncider avec l'image du second point. On lira, par exemple, 35 millimètres sur la règle et le numéro 12 sur le vernier. — On en conclura que la distance verticale des deux points est 2 millimètres et 31 cinquantièmes de millimètre, ou $2^{mm},62$, à $0^{mm}02$ près.

LIVRE PREMIER

PESANTEUR ET HYDROSTATIQUE

CHAPITRE PREMIER

PESANTEUR

I. — PESANTEUR. — CENTRE DE GRAVITÉ

39. Direction de la pesanteur. — Verticale. — On donne le nom de *pesanteur* à la cause qui sollicite les corps à tomber vers le sol, et qui détermine ce mouvement quand les corps ne sont pas soutenus.

Suspendons à l'extrémité d'un fil un corps quelconque, une balle de plomb, par exemple, et prenons à la main l'autre extrémité du fil : l'effort que nous avons à faire pour soutenir le corps montre qu'il est sollicité par une *force*, à laquelle cet effort fait équilibre. — Quant à la direction de cette force, c'est évidemment celle que prend le fil lui-même, quand il arrive au repos : cette direction est ce qu'on nomme la *verticale*.

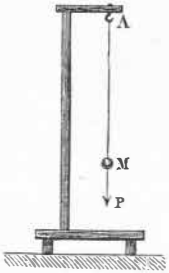


Fig. 22. Fil à plomb.

Cet instrument si simple, que l'on réalise en suspendant à l'extrémité d'un fil un corps solide quelconque (*fig.* 22), est ce qu'on nomme un *fil à plomb*.

40. Tout se passe comme si la pesanteur était due à une attraction émanant du centre de la terre. — Lorsqu'on place plusieurs fils à plomb à côté les uns des autres, ils paraissent parallèles, c'est-à-dire que leurs directions semblent ne jamais devoir se rencontrer, quelque loin qu'on les prolonge. — Mais, d'autre part, l'observation montre que, en chaque point du globe, *la verticale est perpendiculaire à la surface des eaux tranquilles*. Or, la surface des eaux qui recouvrent une partie considérable du globe est sensiblement sphérique; donc, en chaque point, les directions prolongées de toutes les verticales iraient passer sensiblement par le centre de la Terre.

Dès lors, si deux verticales, menées en des points du globe voisins l'un de l'autre A et A′ (*fig.* 23), semblent parallèles, c'est que le point où elles iraient se rencontrer est à une distance considérable, par rapport à la distance des points où on les observe. Mais, si l'on considère des verticales menées en des points suffisamment éloignés l'un de l'autre à la surface du globe, comme A et B, ou A et C, ces verticales font entre elles un angle d'autant plus grand que la distance des deux points est plus considérable.

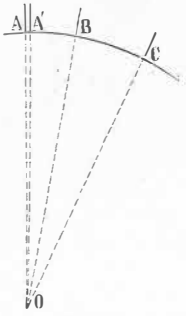


Fig. 23.

Enfin, puisque la verticale, en chaque point du globe, est la direction que suivent les corps pesants, abandonnés à eux-mêmes, on peut dire que tout se passe comme si la pesanteur était due à une *attraction* exercée par la Terre sur les corps, et comme si cette attraction *émanait du centre même du globe* (*).

41. Poids d'un corps. — Centre de gravité. — Lorsqu'on divise un corps quelconque en parties de plus en plus petites, l'observation montre que chacune de ces parties est *pesante*, c'est-à-dire qu'elle tombe quand aucun obstacle ne s'oppose à sa chute. — On est ainsi conduit à considérer l'action de la pesanteur comme s'exerçant à la fois *sur tous les points matériels* dont chaque corps se compose.

Mais, d'autre part, tant que ces divers points sont réunis entre eux, les forces qui les sollicitent, et qui doivent être considérées comme parallèles et de même sens, ont une résultante de même sens qu'elles et égale à leur somme (15). Donc les forces dues à la pesanteur, qui agissent sur les divers points d'un même corps, ont une résultante qui est verticale, dirigée de haut en bas, et égale à la somme de ces forces; on la nomme *poids* du corps. — De là, la définition suivante : *Le poids d'un corps est la résultante des actions de la pesanteur sur tous les points de ce corps.*

Enfin, on sait que la résultante de tout système de forces parallèles passe par un point qui demeure invariable, quelle que soit la direction de ces forces par rapport au corps, pourvu qu'elles restent parallèles entre elles et qu'elles conservent leurs rapports d'intensité (16) : ce point s'appelle, en général, le *centre des forces parallèles;* dans le cas des forces dues à la pesanteur, il prend le nom de *centre de gravité* du

(*) C'est la généralisation de cette idée qui a été le point de départ des immortels travaux de Newton sur les mouvements des astres, et de sa théorie de l'*attraction universelle*. — Dans cette théorie, les mouvements des astres, les uns par rapport aux autres, sont dus à leurs attractions mutuelles, et tout se passe comme si, pour chaque astre en particulier, la force attractive qu'il exerce sur les autres émanait de son centre. Les astres ayant été, à l'origine, lancés dans l'espace, ce sont leurs attractions réciproques qui les maintiennent dans les routes que nous les voyons parcourir.

corps. — Ainsi, *le centre de gravité d'un corps est le point par lequel passe constamment la résultante des forces dues à la pesanteur*, quelque position que l'on donne au corps dans l'espace, et en quelque lieu du globe qu'on le transporte.

42. Détermination expérimentale du centre de gravité. — Lorsqu'un corps est *homogène* (c'est-à-dire lorsqu'il présente, dans toutes ses parties, un même poids sous un même volume), et qu'il est terminé par une surface géométriquement définie, la Mécanique donne des règles qui permettent de trouver la position de son centre de gravité. — Il est, d'ailleurs, des cas où cette position s'obtient immédiatement, par des considérations de symétrie. C'est ainsi que le centre de gravité d'une sphère est au centre de cette sphère ; celui d'un parallélépipède, au point de rencontre des diagonales, etc.

Mais, quelle que soit la forme ou la structure d'un corps solide, on peut déterminer le centre de gravité par le procédé expérimental suivant : — On suspend le corps, par l'un quelconque de ses points A, à l'extrémité d'un fil flexible MA (*fig.* 24), et on laisse l'équilibre s'établir.

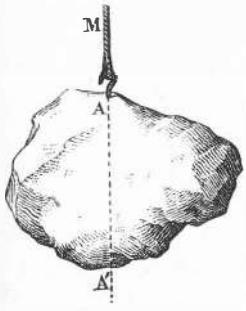


Fig. 24

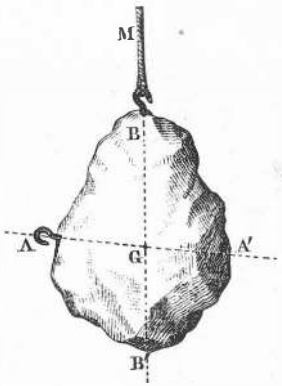


Fig. 25.

Puisque tout se passe comme si le corps était sollicité par une force unique, appliquée en son centre de gravité, il est évident que le fil a dû se placer dans la direction même de cette force : en d'autres termes, si l'on prolonge au travers du corps la direction du fil MA, on peut être certain que ce prolongement AA′ passe par la position, encore inconnue, du centre de gravité. — On suspend alors le corps par un autre point quelconque B (*fig.* 25), et on laisse de nouveau l'équilibre s'établir : le prolongement BB′ de la direction du fil doit encore passer par le centre de gravité. Ces deux droites AA′ et BB′ se coupent donc nécessairement en un point G, qui est le centre de gravité cherché.

Remarque. — On est souvent conduit à considérer, comme centre de gravité d'un corps solide, un point qui ne fait pas partie du corps lui-même. Tel est le cas d'un anneau solide, dont le centre de figure est évidemment le centre de gravité. — Si l'on veut, pour la solution d'une question quelconque, remplacer le système des forces élémentaires qui agissent sur les divers points de l'anneau, par une force unique appliquée en son centre, il est clair qu'on devra raisonner comme si le centre était lié à l'anneau lui-même d'une manière invariable.

43. Équilibre d'un corps mobile autour d'un point fixe. — La connaissance du centre de gravité d'un corps permet souvent d'exprimer d'une manière précise les conditions dans lesquelles un corps peut se trouver en équilibre. — Nous allons prendre, comme exemples, deux des cas les plus simples ; et d'abord, le cas d'un corps *soutenu par un de ses points.*

1° *Équilibre stable.* — Soit un corps de forme quelconque M (*fig.* 26), mobile autour d'un de ses points A. Supposons que le centre de gravité G se trouve *sur la verticale menée par le point* A, *et au-dessous du point* A (*fig.* 26). Il est évident que le corps sera en équilibre ; son poids P, appliqué au point G, dans le prolongement même de la direction AG, n'aura pas d'autre effet que d'appuyer sur le point A. — Dérangeons maintenant le corps, vers la droite, par exemple, et amenons-le dans une autre position M′. Dès que nous l'abandonnerons à lui-même, le poids P, appliqué à la nouvelle position G′ du centre de gravité, aura pour effet de ramener le corps vers la gauche, c'est-à-dire vers sa position primitive M; en vertu de la vitesse qu'il aura ainsi acquise, il dépassera cette position, mais son poids le ramènera alors en sens inverse, et ainsi de suite ; après quelques oscillations de part et d'autre de la position M, il reviendra à cette position.

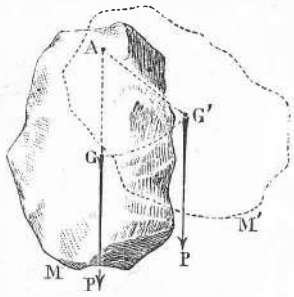


Fig. 26 — Équilibre stable.

On dit alors que la position M est une position d'*équilibre stable,* c'est-à-dire que le corps, si on l'en écarte, tend toujours à y revenir, sous l'action de son poids. — On peut remarquer que c'est la position pour laquelle le centre de gravité est situé *le plus bas possible* au-dessous du point fixe.

2° *Équilibre instable.* — Reprenons maintenant le même corps, mobile toujours autour du point A, et plaçons-le dans une position N, telle que son centre de gravité G se trouve encore *sur la verticale passant par le point* A, mais *au-dessus du point* A (*fig.* 27). Le corps sera encore en équilibre; son poids P, appliqué au centre de gravité G,

dans une direction GA qui passe par le point A, n'aura pas d'autre effet que d'appuyer sur ce point. — Mais, si l'on dérange le corps, vers la droite par exemple, et qu'on l'amène dans une position telle que N′, son poids P, appliqué à la nouvelle position G′ du centre de gravité, tendra à l'écarter de plus en plus vers la droite, et à le ramener à la position M de la figure précédente.

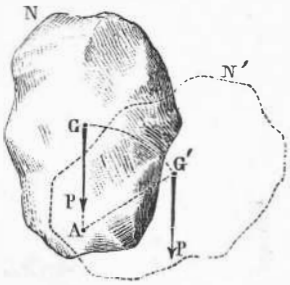


Fig. 27. — Équilibre instable.

On dit alors que la position N est une position d'*équilibre instable*, c'est-à-dire que le corps, si on l'écarte de cette position, continue à s'en écarter de plus en plus, sous l'action de son poids. — On peut remarquer que c'est la position pour laquelle le centre de gravité est situé *le plus haut possible* au-dessus du point fixe.

3° *Équilibre indifférent.* — Considérons enfin le cas tout particulier où le point fixe A serait le *centre de gravité même* du corps (*fig.* 28). — Il est évident que, quelle que soit la position donnée au corps autour de ce point, son poids P, étant alors appliqué au point de suspension lui-même, n'aura jamais d'autre effet que d'appuyer sur ce point.

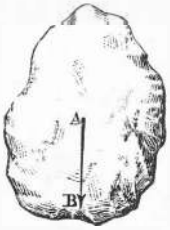


Fig. 28.
Équilibre indifférent.

On dit alors que le corps est en *équilibre indifférent*, c'est-à-dire qu'il reste toujours en équilibre, quelle que soit la position qu'on lui donne autour du point fixe.

44. Équilibre d'un corps placé sur un plan horizontal. — Considérons un corps, comme une chaise ou une table, reposant sur un sol horizontal par un certain nombre de points. Si l'on joint entre eux ces points d'appui, c'est-à-dire les extrémités des pieds de la chaise ou de la table, on obtient un polygone, qu'on appelle *polygone de sustentation*. — Lorsqu'il s'agit d'un corps reposant sur un plan par une surface plane, comme le prisme P ou le prisme P′ (*fig.* 29), le polygone de sustentation n'est autre que la base même du prisme, c'est-à-dire la surface qui comprend tous les points par lesquels il touche le plan qui le soutient.

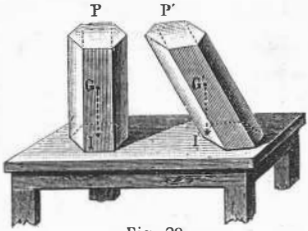


Fig. 29.

Dans tous les cas de ce genre, pour que le corps soit en équilibre, il faut et il suffit que la verticale menée par son centre de gravité vienne

rencontrer le plan d'appui *à l'intérieur du polygone de sustentation.* C'est le cas du prisme P dans la figure 29. — Si cette verticale vient rencontrer le plan d'appui en dehors de ce polygone, le corps se renverse du côté même où tombe le pied de la verticale.

II. — CHUTE DES CORPS.

45. Chute des corps dans le vide. — Lorsqu'on abandonne, à la même distance du sol et au même instant, des corps de diverses natures ou de diverses formes, comme une balle de plomb, un morceau de liège, une feuille de papier, on constate qu'ils mettent, pour arriver au sol, des temps sensiblement différents. — Ces différences sont dues uniquement à la résistance de l'air : c'est ce que montre l'expérience suivante.

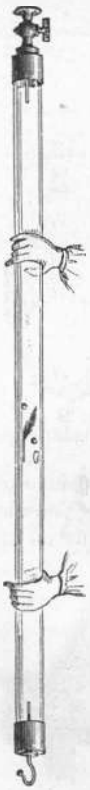


Fig. 30.

On prend un gros tube de verre (*fig.* 30) de deux mètres de longueur environ, fermé à ses extrémités par des garnitures de cuivre, dont l'une est munie d'un robinet. On introduit dans ce tube quelques grains de plomb, de petits morceaux de papier, des barbes de plume, etc. ; puis, on y fait le vide au moyen de la machine pneumatique. L'appareil étant ainsi préparé, si on le retourne brusquement, tous les corps qu'il contient arrivent ensemble à l'extrémité inférieure. Si l'on ouvre un instant le robinet pour laisser rentrer un peu d'air, et qu'on recommence l'expérience, on voit le papier et les barbes de plume rester en arrière sur les grains de plomb ; le retard est d'autant plus grand qu'il est rentré plus d'air. Enfin, quand on ouvre entièrement le robinet, les différences reparaissent, aussi considérables qu'elles le seraient à l'air libre (*).

46. Marteau d'eau. — Lorsqu'on laisse tomber un liquide d'une certaine hauteur, il se subdivise de plus en plus pendant la chute ; si la hauteur de chute est un peu grande, il arrive au sol comme une espèce de pluie. Ce résultat est produit par l'air que le liquide rencontre, et qui s'interpose entre ses parties. — Examinons, en effet, comment se fait la chute d'un liquide dans le vide. Nous emploierons, pour cela, l'appareil connu sous le nom de *marteau d'eau.*

Cet appareil se compose d'un tube de verre (*fig.* 31) terminé en boule à l'une de ses extrémités : on a introduit de l'eau dans le tube, à peu près jusqu'aux deux tiers, et l'on a chassé l'air qui remplissait encore le reste de l'appareil, en faisant bouillir vivement l'eau dans le tube, avant de fermer à la lampe la

(*) Pour faire concevoir, au moins d'une manière générale, les différences que présente la chute des divers corps *dans l'air*, considérons un cas particulièrement

pointe qui surmonte la boule. — Prenons le tube à la main et retournons-le d'abord lentement, de manière à accumuler toute l'eau du côté de la boule ; puis redressons-le brusquement, dans la position indiquée par la figure : le liquide tombe tout d'un bloc, et produit alors, contre le fond du tube, un choc qui a fait donner à cet appareil son nom de *marteau d'eau*.

Fig. 31. — Marteau d'eau.

La subdivision d'un liquide pendant la chute, telle qu'elle se produit dans les conditions ordinaires, est donc due à l'interposition de l'air.

47. Lois de la chute des corps. — Principe de la machine d'Atwood. — Puisque tous les corps prennent dans le vide, sous l'action de la pesanteur, des mouvements identiques, il suffit d'étudier les lois de la chute pour *un seul corps*. — Mais l'étude directe de la chute libre d'un corps *dans le vide* présenterait de grandes difficultés pratiques. Pour étudier les lois du mouvement, on a eu recours à diverses dispositions : l'une des plus simples consiste dans l'emploi de la machine d'Atwood.

La machine d'Atwood, réduite à ses éléments essentiels, se compose d'une poulie R (*fig.* 32) sur laquelle passe un fil de soie très léger,

simple. — Partageons une feuille de papier en deux parties égales. Plions l'une d'elles de manière à en former un petit bloc compact ; laissons l'autre déployée et plaçons-la horizontalement, à la même distance du sol que la première. Ces deux corps ont évidemment une même masse m et un même poids p ; et cependant, si on les abandonne, le premier vient rencontrer le sol bien avant le second. — Or, pour un corps animé d'une vitesse déterminée, la résistance opposée par l'air doit être considérée comme une force dirigée en sens contraire du mouvement, et d'autant plus grande que la surface par laquelle le corps rencontre l'air est plus considérable. Donc, si l'on supposait ces deux corps animés, à un instant déterminé, d'une même vitesse, le premier éprouverait une résistance r, tandis que le second, eu égard à l'étendue de la surface par laquelle il rencontre l'air, éprouverait une résistance R beaucoup plus grande. Ces deux masses égales étant alors sollicitées, l'une par la force $p - r$, l'autre par la force $p - R$, l'accroissement de vitesse éprouvé par la première, dans l'instant suivant, serait supérieur à l'accroissement de vitesse éprouvé par la seconde. Cela revient à dire que les mouvements de ces deux corps ne peuvent être identiques à aucun instant.

Dans la plupart des cas, la loi du mouvement de la chute d'un corps dans l'air est très complexe, la résistance de l'air allant en croissant avec la vitesse. — Si l'on considère, en particulier, un corps formé d'une matière très dense, et ne rencontrant l'air que par une petite partie de sa surface, on peut, tant que la vitesse ne devient pas très grande, considérer la résistance r comme négligeable. Un pareil corps, tombant sous l'action d'une force constante, prend alors un mouvement uniformément accéléré (9). — Si, au contraire, la forme du corps est telle, qu'il rencontre l'air par une portion assez étendue de sa surface, il arrive bientôt un moment où la résistance de l'air tend à devenir égale en grandeur au poids du corps, en sorte que le mouvement tend à devenir uniforme.

supportant à ses extrémités des masses égales M, M, en sorte que les poids de ces masses se font équilibre. Si maintenant on vient à placer une masse additionnelle *m* sur l'une des masses M, l'équilibre n'existe plus; mais comme le seul poids de la masse *m* doit entraîner simultanément les masses fixées aux deux extrémités du fil, on conçoit que ce

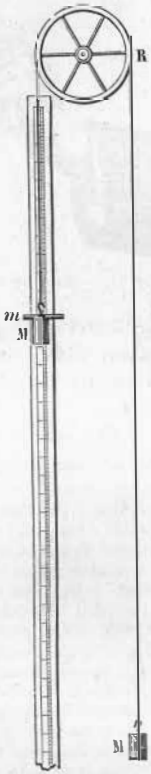


Fig. 32.

Fig. 33.

Fig. 34.

Fig. 35.

mouvement doit être plus lent que celui de la chute libre. — Nous allons l'étudier d'abord, et nous indiquerons ensuite comment il peut conduire aux lois de la chute libre.

Loi des espaces. — Pour déterminer la loi suivant laquelle varient les *espaces* parcourus au bout des temps successifs, on emploie une règle verticale divisée, le long de laquelle descend la masse M + *m*. Cette masse est maintenue au zéro de la règle, jusqu'au moment où le

battement d'une horloge marque le commencement d'une seconde déterminée; la masse est alors abandonnée; on cherche, par tâtonnements, et en recommençant plusieurs fois l'expérience, en quel point de la règle il faut placer une plaque horizontale B portée par un curseur (*fig.* 33), pour qu'elle soit frappée par cette masse à l'instant où l'on entend le battement de l'horloge qui termine cette seconde. On connaît ainsi l'espace e_1 qui est parcouru en une seconde. — On détermine de la même manière les espaces e_2, e_3... parcourus en 2, 3... secondes (*fig.* 34 et 35). En comparant entre eux ces résultats, on trouve que les espaces e_1, e_2, e_3... sont entre eux comme les nombres 1, 4, 9..., c'est-à-dire *comme les carrés des temps.* — C'est la *loi des espaces*, pour le mouvement du système actuel.

Loi des vitesses. — Si maintenant on se propose de mesurer directement, avec l'appareil, les *vitesses* acquises par le système à différents instants du mouvement, on emploie un autre curseur, portant un anneau A (*fig.* 36), qui laissera passer la masse M sans la toucher, mais qui arrêtera au passage la masse additionnelle *m*, dont la forme est allongée. — On place d'abord l'anneau à la division e_1, de manière que la masse *m* soit enlevée au bout d'une seconde; à partir de ce moment, la masse M continue à descendre d'un mouvement uniforme, avec la vitesse qu'elle possédait au moment de la suppression du poids de la masse *m* (5, 2°). On cherche ensuite en quel point il faut placer la plaque B, pour qu'elle soit rencontrée une seconde après la suppression de la masse *m;* la distance des points A et B donne l'espace parcouru en une seconde, dans ce mouvement uniforme, c'est-à-dire la vitesse que le corps avait acquise en arrivant en A, et qu'il a conservée de A en B; soit v_1 cette vitesse. — On détermine de la même manière les vitesses v_2, v_3... acquises au bout de 2, 3... secondes de chute, en plaçant convenablement les deux curseurs (*fig.* 37). On trouve que les vitesses v_1, v_2, v_3... sont entre elles comme les nombres 1, 2, 3..., c'est-à-dire *proportionnelles aux temps.* — C'est la *loi des vitesses,* dans le mouvement actuel (*).

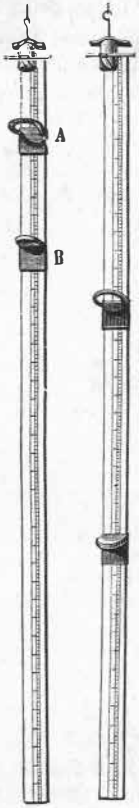


Fig. 36. Fig. 37.

(*) Si, prenant les résultats numériques fournis par ces expériences, on compare la vitesse v_1 à l'espace parcouru e_1, on constate que v_1 est double de e_1.

Il en est d'ailleurs toujours ainsi dans un mouvement uniformément accéléré, et sans vitesse initiale. En effet, si l'on fait $t = 1$ dans les formules établies précédemment (4, *Remarque*), il vient : $v_1 = \gamma$, $e_1 = \frac{\gamma}{2}$, et, par suite, $v_1 = 2e_1$.

48. Détails de construction de la machine d'Atwood. — La figure 38 représente cette machine, telle qu'on l'emploie pour les expériences de Cours. — L'appareil est fixé contre un mur, à une hauteur aussi grande que possible au-dessus du sol.

La poulie R, en aluminium, est mobile autour d'un axe que l'on rend horizontal au moyen des vis calantes V (*). La masse $M + m$ est soutenue, vis-à-vis le zéro de la règle graduée AB, par une plate-forme horizontale s, qui peut, à un moment donné, basculer autour d'un axe.

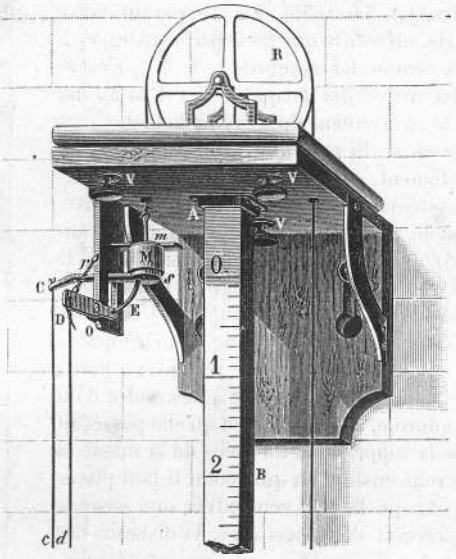


Fig. 38. — Machine d'Atwood.

Avant chaque expérience, la pièce E, en forme d'arc de cercle, solidaire de s, vient buter contre l'extrémité du levier D, en sorte que la plate-forme s est immobilisée. — Lorsque le battement de l'horloge marque le commencement d'une seconde, on agit sur le levier D, au moyen du cordon d, de manière à dégager le butoir E ; la plate-forme s bascule, et la masse $M + m$ se met en mouvement. — Pour recommencer une

(*) Pour donner une mobilité aussi grande que possible à la poulie R, on la fait quelquefois reposer, par chacune des extrémités de son axe, sur les jantes croisées de deux roues : le mouvement de rotation de la poulie R produit alors une rotation beaucoup plus lente des quatre roues qui supportent l'axe, et ne détermine, sur les jantes de ces roues, qu'un frottement de roulement inappréciable ; d'autre part, les axes des roues n'éprouvent, sur leurs supports, que des frottements très faibles, en raison de la lenteur du glissement.

expérience, on ramène la masse $M + m$ au-dessus du zéro de la règle, et au moyen du cordon c on relève la plate-forme s dans la position horizontale; un ressort à boudin r ramène alors le levier D dans sa position primitive.

49. Le mouvement des corps tombant en chute libre, dans le vide, est uniformément accéléré. — On vient d'obtenir deux lois expérimentales, dont une seule suffirait pour établir que le mouvement, *dans la machine d'Atwood*, est uniformément accéléré (*4, Remarque*). Il est facile d'en conclure que le mouvement d'un corps tombant *en chute libre* est de même nature.

En effet, désignons par p le poids de la masse m, et par γ l'accélération dans l'expérience qu'on vient de faire. L'expérience même montre que γ est une quantité constante, égale aux différences constantes $v_2 - v_1$, $v_3 - v_2$.... Cette accélération est produite par l'action de la force p sur la masse de tout le système $2M + m$; la force p est donc constante, et l'on a (12) :

$$p = (2M + m)\gamma.$$

Donc, si la masse m était abandonnée seule dans le vide, elle prendrait, sous l'action de cette force constante p, un mouvement uniformément accéléré (9), et l'accélération g satisferait alors à la relation

$$p = mg.$$

En divisant ces deux relations membre à membre, il vient

$$\frac{g}{\gamma} = \frac{2M + m}{m} \quad \text{ou} \quad g = \gamma \frac{2M + m}{m}.$$

On voit ainsi que les lois de la chute libre sont les mêmes que celles du mouvement dans la machine d'Atwood; mais cette machine, en ralentissant le mouvement, permet d'établir plus facilement ces lois. — Enfin, c'est à cause du ralentissement du mouvement, que l'on peut considérer la résistance de l'air comme négligeable (*).

50. Vérification directe, au moyen de la machine d'Atwood, de la proportionnalité des forces aux accélérations qu'elles impriment à un même système. — Il est intéressant de voir comment on peut vérifier, à l'aide de la machine d'Atwood, que deux forces constantes

(*) Quant à la détermination de la valeur numérique de g, il semble qu'il suffirait, pour l'obtenir, de prendre la valeur de γ fournie par l'expérience, et de la multiplier par le rapport $\frac{2M + m}{m}$, rapport que la balance peut fournir avec une grande précision. — Mais, en réalité, les erreurs commises dans la mesure d'un espace si petit et d'un temps si court, jointes à celles qu'introduisent l'influence des frottements et la masse de la poulie, enlèveraient à cette méthode toute exactitude. — On verra plus loin comment on détermine la valeur de g avec précision, au moyen du pendule (58).

sont entre elles comme les accélérations qu'elles impriment à un même système (10).

Plaçons, sur l'une des masses constantes M (*fig.* 38), cinq petites masses additionnelles, ayant chacune un poids p. La force qui déterminera le mouvement du système sera $5p$. Mesurons l'accélération γ, en prenant, par exemple, le double de l'espace parcouru au bout de la première seconde (note de la page 37). — Transportons alors l'une des masses additionnelles à l'autre extrémité du fil; le système à mettre en mouvement sera encore le même, mais la force productrice du mouvement sera $4p - p$, c'est-à-dire $3p$; déterminons encore, par l'expérience, l'accélération γ'. — On constatera, sur les valeurs numériques de γ et γ' ainsi obtenues, qu'on a

$$\frac{\gamma}{\gamma'} = \frac{5}{3} \quad \text{ou} \quad \frac{\gamma}{\gamma'} = \frac{5p}{3p},$$

égalité qui vérifie le principe énoncé.

51. Principe de l'appareil du général Morin. — L'appareil du général Morin est destiné à la détermination directe des lois de la chute libre, sous l'action de la pesanteur.

Réduit à ses éléments essentiels, cet appareil se compose d'un cylindre vertical, couvert d'une feuille de papier, et animé d'un mouvement de rotation uniforme autour de son axe TT′ (*fig.*.39); au niveau de sa base supérieure, se trouve un corps pesant D, muni d'un crayon horizontal dont la pointe appuie légèrement sur le papier. — Si l'on vient à abandonner ce corps pendant que le cylindre est en mouvement, le crayon trace sur la feuille une courbe telle que CMNPB.

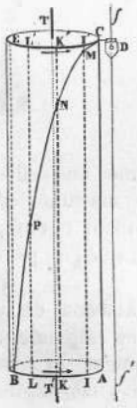


Fig. 39.

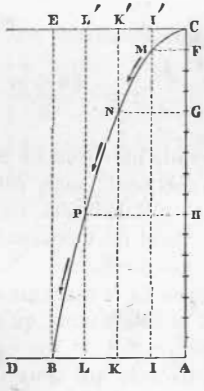


Fig. 40.

L'expérience étant faite, coupons la feuille de papier suivant la verticale CA qui passe par le point de départ C du crayon, et développons-la sur un plan (*fig.* 40); la droite CE, perpendiculaire à CA, n'est autre que le développement de la circonférence qui serait tracée, par le crayon supposé immobile, sur la surface du cylindre tournant. Menons maintenant des droites II′, KK′, LL′..., parallèles à CA et équidistantes entre elles : soient M, N, P..., les points où ces droites rencontrent la courbe. — Lorsque, pendant l'expérience, le crayon s'est trouvé en M, la

génératrice I'I du cylindre avait pris, sous la verticale décrite par la pointe du crayon, la place de CA ; de même, quand le crayon s'est trouvé en N, c'est la génératrice K'K qui avait pris la place de CA. Or, puisque le mouvement de rotation du cylindre est uniforme, ces substitutions ont eu lieu à des intervalles de temps égaux ; en d'autres termes, les temps qu'il a fallu, pour que le crayon arrivât aux points M, N, P, peuvent être considérés comme mesurés par les distances CI', CK', CL' ; c'est-à-dire que ces temps sont entre eux comme les nombres 1, 2, 3.... — D'autre part, les espaces décrits verticalement par le crayon, à ces mêmes instants, sont I'M, K'N, L'P.... Or, en mesurant ces longueurs sur la feuille, on constate qu'elles sont entre elles comme les nombres 1, 4, 9..., c'est-à-dire comme les carrés des temps correspondants.

Donc, *les espaces parcourus en chute libre sont proportionnels aux carrés des temps* : cette loi suffit, comme on l'a vu (*4, Rem.*), pour caractériser un mouvement *uniformément accéléré* (*).

52. Détails de construction de l'appareil du général Morin. — Les conditions que l'on vient de supposer remplies sont réalisées de la manière suivante :

Le corps pesant, dont on doit étudier le mouvement, est une petite masse de fonte D (*fig.* 41), de forme cylindro-conique : la densité de la fonte étant très grande, la perte de poids que ce corps éprouve dans l'air n'a qu'une valeur relative peu considérable, et sa forme lui permet de fendre plus facilement l'air pendant le mouvement. Il porte un petit crayon qui vient s'appuyer sur le cylindre tournant SS, et, pour que ce frottement ne le fasse pas dévier de la verticale, on y a ménagé deux petits appendices munis de trous, dans lesquels passent deux fils métalliques verticaux *ff'*, *gg'*, servant de guides. — Le crochet *a*, engagé d'abord dans le crochet *b*, sert à maintenir le corps D, jusqu'au moment où il sera abandonné sous l'action de la pesanteur.

Pour faire une expérience, on règle d'abord la verticalité de l'axe du cylindre, au moyen des vis calantes V, V, V ; puis, au moyen de la manivelle *h*, on enroule sur le tambour U la corde qui soutient le

(*) Théoriquement, il semble que, pour déduire du résultat de l'expérience la valeur numérique de l'accélération g, il suffirait de connaître la vitesse de rotation que possédait le cylindre, ou le nombre de tours ou fractions de tours effectués en une seconde. — En effet, on connaîtrait alors la grandeur de l'*arc parcouru en une seconde* par un point de la surface du cylindre : alors, en mesurant, *avec cette unité*, la distance CL', par exemple (*fig.* 40), on connaîtrait le temps écoulé depuis le commencement de la chute du corps jusqu'à l'instant où il est arrivé en P. D'autre part, la mesure de la longueur L'P, en centimètres, donnerait l'espace parcouru à cet instant. Par suite, dans la formule $e = \frac{gt^2}{2}$, on connaîtrait un système de valeurs numériques correspondantes de t et de e, ce qui permettrait de calculer g.

Mais cette méthode offre, dans la détermination de chacune des deux quantités t et e, des difficultés pratiques qui ne permettraient d'obtenir g qu'avec une approximation très grossière. — La méthode du pendule, qui sera exposée plus loin (58), est la seule qui présente une précision suffisante.

poids R. Lorsqu'on vient ensuite à abandonner le tambour, le système se met en mouvement en sens contraire, sous l'action du poids R : ce mouvement est transmis, par une roue dentée, à une vis sans fin v, placée sur l'axe du cylindre SS, en sorte que le cylindre lui-même est

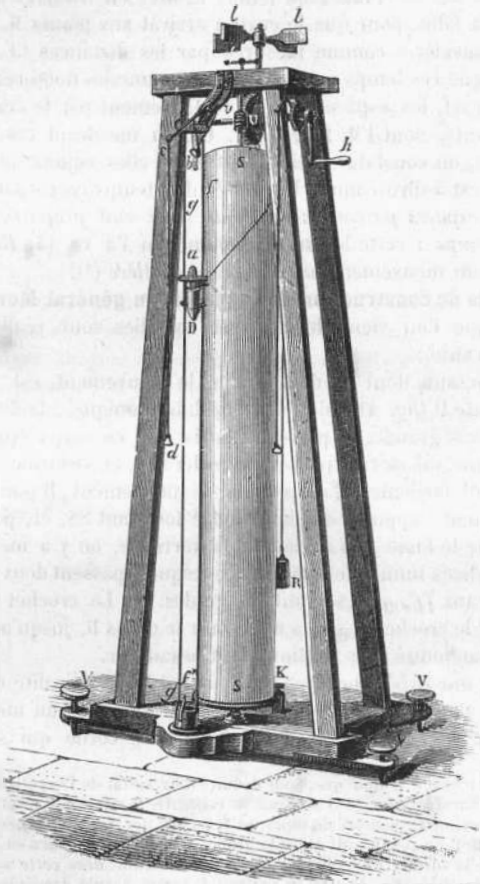


Fig. 41. — Appareil du général Morin.

mis en mouvement. Ce mouvement tendrait à s'accélérer sans cesse : mais, les ailettes l,l étant entraînées en même temps et rencontrant dans l'air une résistance qui augmente rapidement avec la vitesse, il arrive bientôt un moment où la vitesse devient sensiblement constante : ce moment est généralement atteint quand le poids moteur R a

effectué environ les deux tiers de sa descente. — C'est alors que, en tirant sur le cordon *cd*, on dégage le crochet *b;* la masse D se met en mouvement, et le crayon trace sur le papier la courbe qui donne la loi de la chute.

III. — PENDULE.

53. Mouvement du pendule simple. — Nous appellerons *pendule*, un corps pesant quelconque, mobile autour d'un axe fixe, appelé *axe de suspension*, cet axe ne passant pas par son centre de gravité. — Dans le pendule ainsi défini, chaque point du corps est assujetti à décrire un arc de cercle dont le centre est sur l'axe de suspension ; la perpendiculaire menée du point considéré sur l'axe de suspension demeure toujours dans un même plan (*).

Le pendule est en équilibre stable, lorsque son centre de gravité est au-dessous de l'axe de suspension, dans le plan vertical passant par cet axe (43, 1°) ; si on le dérange de cette position, il y revient, en exécutant de part et d'autre une série d'oscillations.

Pour analyser le phénomène, nous imaginerons d'abord un pendule idéal, le *pendule simple*, qui se composerait d'un point matériel suspendu à l'extrémité d'un fil sans poids, flexible, inextensible, l'autre extrémité du fil étant fixe. Pour se rapprocher de ces conditions toutes théoriques, on pourra employer une petite sphère pesante M, suspendue à un fil fin et flexible (*fig.* 42).

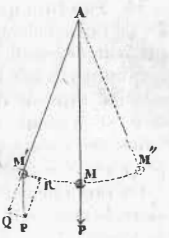


Fig. 42.
Pendule simple.

Si l'on amène le pendule dans la position AM′ et qu'on l'abandonne à lui-même, il ne peut conserver cette position. En effet, le poids P de la sphère, qui est une force verticale, peut se décomposer en deux forces : l'une Q, dirigée suivant le prolongement du fil, et qui n'a d'autre effet que de le tendre ; l'autre R, perpendiculaire à cette direction, c'est-à-dire tangente à l'arc de cercle M′M, et qui sollicite la sphère à revenir vers le point M. Comme il en est de même tant que la sphère est à gauche de M, celle-ci parcourt, avec une vitesse croissante, l'arc de cercle M′M. Arrivée en M, elle dépasse la position d'équilibre, en vertu de la vitesse acquise ; mais la composante tangentielle du poids, agissant maintenant en sens contraire du mouvement, diminue peu à peu la vitesse, et finit par l'annuler. A ce moment, le pendule, parvenu en AM″, a accompli *une oscillation*. — La pesanteur continuant à agir sur le corps, il redescend

(*) On appelle plus généralement *pendule*, un corps pesant mobile autour d'un point fixe, appelé *point de suspension*, ce point étant différent du centre de gravité. Chaque point du pendule peut alors se déplacer sur une sphère dont le centre est le point de suspension ; la droite qui joint le point considéré au point de suspension décrit un cône ; c'est pourquoi ce pendule prend le nom de *pendule conique*.

l'arc M″M, remonte de l'autre côté du point M jusqu'à ce que sa vitesse redevienne nulle, puis revient encore sur lui-même, et accomplit ainsi une série d'oscillations, alternativement dans un sens et dans l'autre.

La théorie montre qu'un pendule simple, partant d'une position AM′, doit parvenir, de l'autre côté de la verticale, *jusqu'à la position symétrique* AM″; dès lors, partant ensuite de AM″, il doit revenir en AM′, et ainsi de suite; en d'autres termes, ses oscillations doivent conserver indéfiniment la *même amplitude*, et par suite la *même durée*.

En soumettant la question au calcul, et considérant seulement le cas où *l'amplitude des oscillations est très petite*, on trouve que la durée constante d'une oscillation est donnée par la formule

$$t = \pi\sqrt{\frac{l}{g}},$$

dans laquelle t désigne la durée de l'oscillation, et π le rapport de la circonférence au diamètre. — Dans le système C.G.S. la longueur l du pendule est exprimée en centimètres, et g en unités C.G.S. Dans le suystème des unités de la Mécanique, l serait exprimé en mètres, et g en unités d'accélération de ce système.

54. Pendule quelconque, oscillant dans le vide et sans frottement. — Le raisonnement donné pour un pendule simple subsiste pour un pendule quelconque, dont le point M serait le centre de gravité et dont l'axe de suspension passerait par le point A. — *L'oscillation* est alors le passage d'une position extrême du pendule à l'autre position extrême; la *durée* de l'oscillation est le temps nécessaire pour effectuer ce trajet : l'*amplitude* de l'oscillation est l'angle que forment entre elles les deux positions extrêmes de la perpendiculaire abaissée du centre de gravité sur l'axe de suspension.

Un raisonnement simple suffit pour montrer que, quand un pendule oscille *dans le vide*, sans frottement sur son axe, les positions extrêmes du centre de gravité M′ et M″ sont dans un même plan horizontal. — Considérons, en effet, les variations qu'éprouvent la force vive et l'énergie potentielle du système constitué par le globe terrestre et le pendule, pendant une oscillation, de M′ en M″. Au point M′, le pendule partant du repos, la force vive est nulle : l'énergie potentielle dépend de l'altitude du point M′. Au point M, cette altitude est minima, l'énergie potentielle est minima, et par suite, en vertu du principe de la conservation de l'énergie (52), la force vive est maxima. A la fin de l'oscillation, la force vive est redevenue nulle, l'énergie potentielle doit donc avoir la même valeur qu'au point M′, c'est-à-dire que les deux positions extrêmes du centre de gravité, M′ et M″, doivent être dans un même plan horizontal. — Il en résulte immédiatement que toutes les oscillations successives doivent avoir même amplitude et même durée.

Il n'en est plus de même quand le pendule oscille *dans l'air*; en raison de la résistance de l'air et des frottements, l'énergie totale diminue d'une oscillation à l'autre; les points M′, M″.... se rapprochent peu à peu du point M. l'amplitude des oscillations va en décroissant progressivement.

55. Pendule composé. — Tout pendule qui n'est pas un pendule simple est un pendule composé. — On démontre, en Mécanique, qu'à

un pendule composé quelconque correspond un pendule simple qui lui est *synchrone*. Il faut entendre par là que, dans un pendule composé, il existe toujours une droite parallèle à l'axe de suspension, et dont tous les points ont, à chaque instant, la même vitesse que l'extrémité d'un pendule simple, *qui aurait pour longueur la distance de cette droite à l'axe de suspension*. Cette droite s'appelle *axe d'oscillation*.

Dans le cas particulier où le pendule est formé d'une sphère pesante, suspendue par un fil très léger et ayant une longueur très grande par rapport au rayon de la sphère, on démontre qu'on peut prendre, pour longueur du pendule simple synchrone, la distance du centre de la sphère au point de suspension du fil.

56. Isochronisme des petites oscillations. — Quand un pendule oscille dans l'air, la résistance de l'air et les frottements diminuent à chaque instant sa vitesse, en sorte que les amplitudes des oscillations vont en diminuant peu à peu, jusqu'à devenir insensibles.

En observant les mouvements d'une lampe suspendue à la voûte de la cathédrale de Pise, Galilée remarqua que, malgré la décroissance de l'amplitude, *les oscillations de faible amplitude conservent une même durée*. — Pour vérifier expérimentalement cette loi, on fera osciller un pendule, et quand les oscillations seront devenues suffisamment petites, on déterminera, à l'aide d'une montre à secondes, la durée de 100 oscillations, dont l'amplitude moyenne sera, par exemple, 4 degrés. Quelques minutes après, l'amplitude des oscillations n'étant plus que 2 degrés, on déterminera de nouveau la durée de 100 oscillations; le résultat sera le même que le précédent.

La loi de Galilée peut s'énoncer ainsi : *En un même lieu, les oscillations de faible amplitude d'un même pendule restent isochrones*. Cette loi n'est qu'approximative; elle est d'autant mieux vérifiée que l'amplitude des oscillations est plus petite.

57. Lois du pendule. — Les lois du pendule, au nombre de quatre, peuvent se déduire toutes de la formule précédente, $t = \pi \sqrt{\frac{l}{g}}$.

1° Dans cette formule, exacte pour les oscillations de faible amplitude, n'entre pas la valeur de l'amplitude elle-même; donc toutes les oscillations de faible amplitude sont isochrones. C'est la loi de l'isochronisme, qui vient d'être énoncée.

2° Dans la valeur de t n'intervient pas non plus la densité de la matière du pendule. Et en effet, si l'on construit divers pendules de même longueur, avec des sphères de plomb, de cuivre, d'ivoire,... ayant même diamètre, et si on les fait osciller dans un même lieu, on trouve que la durée des oscillations est sensiblement la même pour tous; dans le vide, les oscillations auraient exactement la même durée. — De là, cette loi : dans le vide, la durée de l'oscillation d'un pendule *est indépendante de la matière qui le constitue*.

Ce résultat, trouvé par Galilée, peut être considéré comme démontrant que *l'accélération g, imprimée par la pesanteur à divers corps, en un même lieu, est la même.*

3° D'après la formule du pendule, la valeur de t est proportionnelle à la racine carrée de l. — De là, cette loi : les durées des oscillations de deux pendules de longueurs différentes, en un même lieu, sont *proportionnelles aux racines carrées des longueurs.* — On peut vérifier ce résultat en faisant osciller simultanément deux pendules, formés chacun d'une sphère métallique suspendue à un fil fin, et ayant respectivement pour longueurs 1 mètre et 25 centimètres; le premier, qui bat sensiblement la seconde, ne fait qu'une oscillation pendant que le second en fait deux.

4° Enfin, d'après la même formule, t dépend de g : si g varie, t doit varier, en sens inverse. Or, il résulte de nombreuses observations, faites par Borda et par d'autres physiciens, que la durée de l'oscillation du même pendule, en chaque lieu du Globe, varie avec la *latitude* du lieu, et avec son *altitude.* Il en faut conclure que l'accélération de la chute des corps n'est pas la même aux différents points du Globe, et qu'elle dépend des mêmes conditions. — On va voir que ce sont ces valeurs de l'accélération qui servent de mesure à *l'intensité de la pesanteur*, en chaque lieu.

58. Détermination des valeurs de l'intensité de la pesanteur. — On appelle *intensité de la pesanteur*, en un point du Globe, la force qui résulte de l'action de la pesanteur sur l'unité de masse. — Dans la formule $p = mg$, si l'on fait $m = 1$, on a $p = g$; c'est-à-dire que l'intensité de la pesanteur et l'accélération de la chute des corps, dans le même lieu, sont représentées par *le même nombre.*

De la formule $t = \pi\sqrt{\frac{l}{g}}$, on tire $g = \frac{\pi^2 l}{t^2}$. On fera donc osciller un pendule en un lieu déterminé; si l'on mesure sa longueur en centimètres et la durée de son oscillation en secondes, on en déduira la valeur de g en unités C.G.S., dans le lieu de l'expérience. — Si l'on évaluait l en mètres et t en secondes, on aurait la valeur de g dans l'ancien système d'unités; cette valeur serait représentée par un nombre cent fois plus petit.

59. Variations de l'intensité de la pesanteur aux divers points du Globe. — Les mesures effectuées, au moyen du pendule, ont montré que l'intensité de la pesanteur augmente lorsqu'on s'éloigne de l'équateur terrestre pour se rapprocher des pôles (*).

(*) Cette augmentation est déterminée, en partie, par l'aplatissement de la Terre vers ses pôles; mais elle est due, principalement, au mouvement de rotation de la Terre autour de son axe, mouvement dans lequel les divers points de la surface du Globe ont, sur les circonférences qu'ils décrivent, des vitesses d'autant plus petites qu'ils sont plus voisins des pôles.

D'après les mesures de Borda et des savants contemporains, la valeur de g est :

A l'équateur.	A Paris.	A la latitude de 80°
978,10	980,96	983,00

L'intensité de la pesanteur augmente donc, de l'équateur au pôle, d'environ $\frac{1}{200}$ de sa valeur.

On a constaté également que, à latitude égale, l'intensité de la pesanteur diminue à mesure qu'on s'élève dans l'atmosphère ; elle est plus grande au niveau de la mer que sur les continents élevés ou sur le sommet des montagnes.

60. Application du pendule aux horloges. — L'isochronisme des oscillations du pendule est mis à profit pour régulariser le mouvement des horloges. La disposition qui est le plus ordinairement employée, et qui est connue sous le nom d'*échappement à ancre*, a été imaginée par Huyghens en 1657 (*).

Le mouvement de l'horloge est produit, soit par la détente d'un ressort, soit par la chute d'un poids, supporté par une corde enroulée sur un arbre. Le mouvement de rotation de cet arbre se transmet aux divers rouages de l'horloge ; il est clair qu'il tendrait à s'accélérer sans cesse, sous l'action continue du poids ou du ressort.

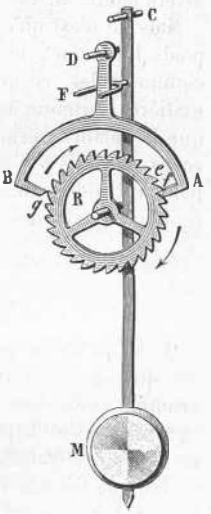


Fig. 45.
Échappement à ancre.

Une pièce AB, en forme d'*ancre*, mobile autour d'un axe D, est placée au-dessus de la roue R, que le poids ou le ressort moteur met en mouvement ; cette pièce AB est solidaire de la tige d'un pendule M ou *balancier*, mobile autour de son axe de suspension C. — Quand le balancier est au repos, l'une des dents f de la roue R vient appuyer sur la face supérieure du crochet A de l'ancre (*fig.* 45), et l'horloge est arrêtée. Mais, une fois le balancier mis en mouvement, il entraîne l'ancre dans son oscillation : le crochet A s'éloignant de la roue vers la droite, la dent f qui appuyait sur ce crochet devient libre ; la roue peut alors tourner sous l'action du poids ou du ressort qui la sollicite, dans le sens de la flèche, jusqu'à ce que l'autre crochet B vienne arrêter la dent qui se trouvait au-dessous de lui, et qui arrive en contact avec sa face inférieure. — A son oscillation suivante, l'ancre

(*) C'est à cette époque que Huyghens présenta aux États de Hollande une horloge réglée par le mouvement d'un pendule. — Cette invention se répandit rapidement, et on donna bientôt, par extension, le nom de *pendules* aux horloges qui furent construites sur le modèle de celle de Huyghens.

se mettant en mouvement vers la droite, le crochet B abandonne la dent qu'il avait arrêtée, et la roue peut tourner de nouveau, jusqu'à ce que le crochet A de l'ancre vienne rencontrer la dent *e*, et ainsi de suite. — Dès lors, le mouvement de la roue ne peut plus s'effectuer que par saccades, se succédant à intervalles de temps égaux, comme les oscillations du balancier, et le mouvement de l'horloge est ainsi régularisé. — Ce sont les chocs produits par les crochets de l'ancre, sur les dents de cette *roue de rencontre*, qui produisent le battement de l'horloge.

IV. — BALANCE.

61. Mesure des poids et des masses — L'intensité g de la pesanteur étant variable avec la latitude et avec l'altitude (59), le poids P d'un corps de masse M, ayant pour valeur $P = Mg$, est une quantité variable d'un point à un autre du Globe : un même corps, suspendu à un dynamomètre suffisamment sensible, ne lui ferait pas éprouver, aux divers points du Globe, une flexion rigoureusement constante.

Mais ce n'est qu'exceptionnellement qu'on cherche à déterminer le poids lui-même; le plus souvent, par exemple dans les transactions commerciales, ce qu'on a intérêt à connaître, c'est la quantité de matière contenue dans un corps, c'est-à-dire sa *masse*. — On va voir que la balance permet de comparer, *en un même lieu*, le poids P d'un corps au poids p d'un autre corps pris comme unité : le rapport de ces poids est indépendant de la valeur de g dans le lieu considéré, il est égal au rapport des masses; on a, en effet,

$$\frac{P}{p} = \frac{Mg}{mg} = \frac{M}{m}.$$

Or les *poids marqués*, dont on se sert pour les pesées, sont des masses qui ont été échantillonnées en prenant pour unité la masse m du gramme : elles sont respectivement égales au gramme, à ses multiples et à ses sous-multiples. Dès lors, le nombre que fournit une pesée, pour un corps déterminé, représente la *masse* M de ce corps, en grammes (*). — Dans le langage usuel, on emploie constamment le mot *poids* pour le mot *masse;* c'est ce que nous ferons souvent anssi, dans ce qui va suivre.

62. Balance. — Justesse et sensibilité. — La balance se compose essentiellement d'une barre rigide ou *fléau* AB (*fig.* 44), traversée, en son milieu C, par un couteau d'acier trempé, qui fait saillie des deux

(*) Pour avoir le poids P du corps, en dynes, il faudrait multiplier le nombre qui mesure la masse par le nombre qui mesure l'intensité de la pesanteur, au point où l'on opère (59) : $P = Mg$.

côtés : l'arête inférieure de ce couteau repose, de part et d'autre, sur deux petits plans d'acier trempé ou d'agate, situés l'un en avant, l'autre

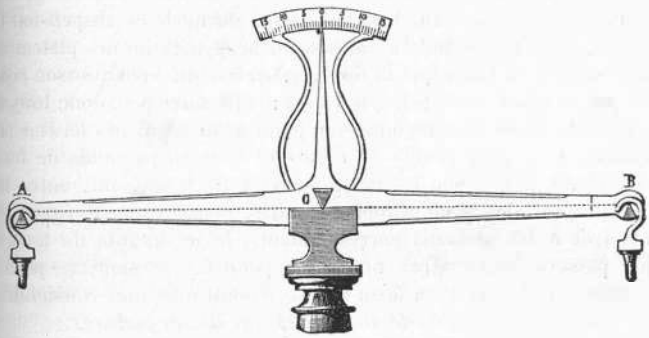


Fig. 44.

en arrière du fléau, et dans un même plan horizontal ; le fléau peut ainsi osciller librement autour de cette arête. Aux extrémités A et B du fléau sont fixés deux couteaux qui tournent en haut leurs arêtes vives, et sur lesquels s'appuient les crochets qui portent les plateaux destinés à recevoir les corps ou les poids marqués. — Les arêtes des trois couteaux A, B, C, sont parallèles et situées dans un même plan ; pour simplifier le langage, dans tout ce qui va suivre, nous les supposerons réduites à trois points *situés en ligne droite*, et nous nommerons *ligne du fléau* la droite qui joint ces points ; nous appellerons *bras du fléau* les distances AC, BC, des couteaux extrêmes au couteau médian. — Perpendiculairement à la ligne du fléau, et en son milieu, est fixée une aiguille, dont l'extrémité peut parcourir un petit arc de cercle divisé, fixé au support de la balance. On a marqué zéro au point qui correspond à la position horizontale du fléau, et on a tracé des divisions symétriques de part et d'autre de ce point.

Pour effectuer *une pesée*, la méthode vulgaire consiste à placer le corps dans l'un des plateaux, et des poids marqués dans l'autre plateau, jusqu'à ce que le fléau se tienne en équilibre dans la position horizontale. On fait la somme des poids marqués, et l'on considère cette somme comme exprimant le poids du corps lui-même.

Mais, pour qu'on puisse compter sur l'exactitude du résultat, il faut à la fois : 1° que la balance soit *juste*, c'est-à-dire que le fléau se tienne horizontal sous la charge des masses égales, placées dans les deux plateaux ; 2° qu'elle soit *sensible*, c'est-à-dire que l'addition d'une masse très petite, dans l'un des plateaux, dérange le fléau de sa position. — Chacune de ces qualités correspond à des conditions géométriques, que le constructeur cherche à réaliser.

63. Conditions géométriques de justesse. — Avant d'énoncer les conditions géométriques de justesse, nous ferons remarquer que le fléau et les plateaux constituent un système dont la forme est variable avec l'inclinaison du fléau. Mais, en raison du mode de suspension des plateaux, quelle que soit la position du fléau, chacun des plateaux se place toujours de façon que la force verticale a, qui constitue son poids, passe par le point de suspension A (43) : cette force peut donc toujours être considérée comme appliquée au point A du fléau. Dès lors on peut considérer le système comme se réduisant à un corps solide de forme invariable, le fléau, dont les deux points A et B auraient, outre leur poids propre, des poids supplémentaires respectivement égaux aux poids a et b des plateaux correspondants. La résultante de tous ces poids passera toujours par un même point G, occupant une position déterminée par rapport au fléau : c'est ce point que nous conviendrons d'appeler *le centre de gravité du fléau chargé de ses plateaux*.

Nous allons démontrer qu'une balance est juste, lorsqu'elle satisfait à la fois aux deux conditions géométriques suivantes :

1° *Que le centre de gravité du fléau chargé de ses plateaux soit sur une perpendiculaire à la ligne du fléau, passant par le point de suspension ;*

2° *Que les deux bras du fléau soient d'égale longueur.*

En effet, soient AB (*fig.* 45) la ligne du fléau et C son point de suspension ; soit G le centre de gravité du fléau chargé de ses plateaux ; supposons que ce point soit sur la perpendiculaire menée à AB par le point C. Si le fléau est placé horizontalement, et que les plateaux soient *vides*, le point G sera dans la verticale du point de suspension : il y aura donc équilibre (43), et le poids M du système mobile n'aura d'autre effet que d'appuyer l'axe sur ses supports. On voit même que, si le point G est *au-dessous de l'axe* C, comme le suppose la figure, l'équilibre sera stable ; car, si le fléau est écarté en A'B', le poids M tendra à ramener le point G' en G, dans la verticale du point C et au-dessous de ce point. — Donc, si la première des conditions énoncées est remplie, *lorsque la balance est vide*, le fléau placé horizontalement se tient en équilibre ; et si le point G est au-dessous de l'axe de suspension, cet équilibre est stable.

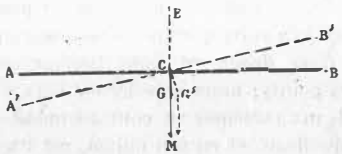


Fig. 45.

Supposons maintenant, en outre, que les deux bras du fléau soient d'égale longueur, et plaçons, dans les deux plateaux, *des masses égales*. Les poids de ces masses agiront aux extrémités A et B comme deux forces verticales P, P (*fig.* 46), égales et parallèles : leur résultante sera une force égale à leur somme, et passant par le milieu de AB, c'est-à-dire par le point C lui-même ; elle pourra être considérée comme

appliquée en C, et n'aura d'autre effet que de produire une pression de l'axe sur ses supports; donc le fléau restera horizontal. On voit même que, si le point G est placé au-dessous de l'axe C, le fléau écarté en A'B' sera encore ramené à la position AB par le poids M de la partie mobile. — Donc, si la seconde condition énoncée est remplie en même temps que la première, le fléau placé horizontalement reste en équilibre sous la charge de *poids égaux*; cet équilibre est stable, si le point G est au-dessous de l'axe de suspension.

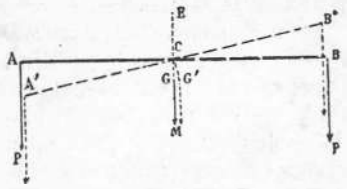


Fig. 46.

Il nous reste à dire quelques mots des cas où, les deux conditions de justesse étant remplies, le point G ne serait pas au-dessous de l'axe de suspension. — Si ce point était *sur l'axe lui-même*, les plateaux étant vides ou chargés de poids égaux, le fléau placé horizontalement serait en équilibre; mais s'il venait à être amené dans une autre position, il y demeurerait encore : il serait donc dans un état d'équilibre indifférent (43, 3°). — Enfin, si le point G était *au-dessus de l'axe*, la balance, vide ou chargée de poids égaux, serait encore en équilibre lorsque la ligne du fléau serait horizontale; mais cet équilibre serait instable, c'est-à-dire que l'instrument se renverserait dès qu'on viendrait à l'écarter de cette position (43, 2°). Une semblable balance est dite *folle*. — Donc, pour qu'une balance remplissant les conditions de justesse soit d'un usage commode, il faut que le centre de gravité du fléau chargé de ses plateaux soit *au-dessous de l'axe de suspension*, seul cas où la position horizontale du fléau constitue une position d'équilibre stable.

64. Réalisation pratique des conditions de justesse. — Pour réaliser les conditions de justesse, le constructeur cherche à faire le fléau et les plateaux aussi symétriques que possible, quant aux poids et aux dimensions de leurs diverses parties (*). — C'est pour conserver l'égalité des bras dans toutes les positions de l'instrument, qu'on fait reposer sur des arêtes vives les crochets qui supportent les plateaux : les points de contact de ces crochets avec le fléau restent ainsi toujours les mêmes, quelle que soit l'inclinaison du fléau.

65. Constatation expérimentale de la justesse. — La balance une fois construite, on peut vérifier si elle est juste, sans qu'il soit néces-

(*) Si le fléau est bien symétrique par rapport à un plan passant par l'axe de suspension et perpendiculaire à la ligne du fléau, le centre de gravité *du fléau considéré seul* est situé dans ce même plan. Si, en outre, les deux plateaux ont des poids égaux, on peut suspendre indifféremment chacun d'eux d'un côté et de l'autre, sans que le point par lequel passe le poids *du système* cesse d'être dans le même plan, c'est-à-dire sans que la première condition de justesse cesse d'être réalisée.

saire d'avoir des masses dont l'égalité ait été préalablement constatée. Pour cela, on fait successivement les deux opérations suivantes :

1° On abandonne la balance à elle-même, les plateaux étant vides. Si le fléau s'arrête dans la position horizontale, on en peut conclure que le point G est convenablement placé (c'est la première condition de justesse). — S'il n'en était pas ainsi, on pourrait toujours corriger ce défaut de l'instrument, en ajoutant d'un côté, *une fois pour toutes*, une charge suffisante pour ramener le fléau à l'horizontalité.

2° Pour vérifier ensuite l'égalité des deux bras (seconde condition de justesse), on place un corps quelconque dans l'un des plateaux, et de la grenaille de plomb ou du sable dans l'autre, en quantité telle que l'aiguille s'arrête au zéro : l'équilibre étant établi, on transporte dans le plateau de droite la charge qui était à gauche, et dans le plateau de gauche celle qui était à droite : si l'aiguille revient encore au zéro, on peut affirmer que les bras sont égaux. — En effet, si l'un deux AC était plus petit que l'autre, on aurait été conduit à mettre d'abord du côté A une charge plus grande que du côté B ; donc, en intervertissant les charges sans les modifier, on placerait la plus petite charge à l'extrémité du bras le plus court, et l'équilibre serait détruit. — Donc, si le fléau reste horizontal, les bras sont égaux, et la balance est définitivement juste.

66. Conditions géométriques de sensibilité. — 1° On dit qu'une balance a une *sensibilité constante*, lorsque, l'équilibre étant établi, l'addition d'une surcharge déterminée, dans l'un des plateaux, fait toujours incliner le fléau d'un même angle, quelle que soit la charge primitive. — Pour qu'il en soit ainsi, la condition géométrique est *que les trois couteaux soient en ligne droite.*

2° Si l'on veut que la sensibilité soit *aussi grande que possible*, c'est-à-dire que, l'équilibre étant établi, l'addition d'une surcharge déterminée dans l'un des plateaux produise une inclinaison du fléau aussi grande que possible, il faut *que les bras soient aussi longs que possible, que le poids de la balance soit aussi petit que possible, et que le point G soit aussi voisin que possible de l'axe de suspension.*

Considérons, en effet, une balance dont les trois couteaux A,C,B soient en ligne droite (*fig.* 47). Cette balance étant supposée juste, et l'équilibre étant d'abord établi au moyen de poids égaux P,P′, placés dans les plateaux, ajoutons dans le plateau de gauche, par exemple, une surcharge déterminée p : le fléau prend une nouvelle position A′B′ ; cherchons quel doit être l'angle de A′B′ avec la position primitive AB. — La résultante des forces P et P′ passant toujours par le point fixe C, il suffira d'exprimer que la force p, appliquée en A′, fait équilibre au poids M de la balance elle-même, appliqué maintenant suivant G′M′, ou, en d'autres termes, que la résultante des deux forces p et M′ passe par le point C. Or, transportons les points d'application des deux forces

p et M′ aux deux points I et II où leurs directions prolongés vont rencontrer la direction AB, ces deux points étant supposées liés invariablement au fléau (13); pour que la résultante de ces deux forces parallèles passe par le point C, il faut et il suffit (15, 1°) que l'on ait :

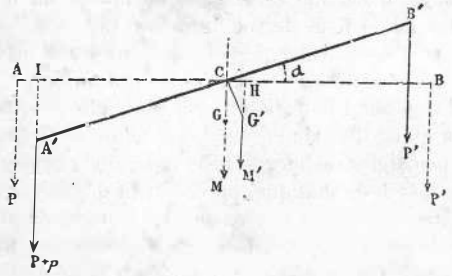


Fig. 47.

$$\frac{CH}{CI} = \frac{p}{M}.$$

Désignons par l la longueur du bras A′C; par d la distance CG ou CG′, et par α l'angle dont le fléau s'est incliné. Les triangles rectangles A′IC et G′HC donnent $CH = d \sin \alpha$ et $CI = l \cos \alpha$; en substituant ces valeurs dans la relation précédente, on a

$$\frac{d \sin \alpha}{l \cos \alpha} = \frac{p}{M};$$

d'où

$$\operatorname{tang} \alpha = \frac{pl}{Md}.$$

On voit : 1° que cette expression est indépendante de la charge primitive; 2° que, pour une même valeur de la surcharge p, la tangente de l'angle α est *proportionnelle à la longueur* l du bras du fléau, *en raison inverse du poids* M de la balance, *et en raison inverse de la distance* d *du point* G *à l'axe de suspension.*

Enfin, dans la pratique, l'inclinaison α étant toujours très petite, on peut prendre l'angle lui-même pour sa tangente. Dès lors, *pour une même balance*, les quantités l, M et d étant constantes, les valeurs de l'inclinaison α sont proportionnelles aux valeurs de la surcharge p.

67. Réalisation pratique des conditions de sensibilité. — Il résulte de ce qui précède que, pour rendre une balance très sensible, on doit chercher à faire le fléau très long et très léger, et cependant assez rigide pour que, la balance étant chargée, la ligne du fléau reste droite. —

Ces conditions sont difficiles à concilier; cependant, on peut allier jusqu'à un certain point la légèreté à la rigidité, en taillant le fléau en forme de losange, dans une règle plate de bronze ou d'acier, et en évidant une grande partie de son intérieur (*fig.* 48). — On appelle *limite de charge* d'une balance, le poids le plus grand qu'on puisse lui faire porter sans faire fléchir sensiblement le fléau.

Enfin, on dit qu'une balance est sensible au *milligramme* ou au *centigramme*, selon qu'il suffit d'une surcharge d'un milligramme ou d'un centigramme pour faire incliner le fléau d'un angle appréciable.

Pour les besoins de la pratique, on construit des balances de dimensions très diverses, selon les pesées qu'elles doivent effectuer. — Les unes sont destinées aux corps très légers; elles ont un fléau très faible, et peuvent être rendues sensibles au demi-milligramme. — D'autres sont destinées aux corps plus pesants; elles ont un fléau plus résistant et peuvent supporter, sans fléchir, des poids assez considérables. Ces dernières ne sont généralement guère sensibles qu'au centigramme; mais une erreur d'un centigramme sur un poids de plusieurs kilogrammes a peu d'importance, en sorte que la *sensibilité relative* de ces balances peut être comparable à celle des balances les plus délicates, à la condition qu'on les emploie à évaluer des poids suffisamment considérables.

68. Méthode de la double pesée. — Les conditions de justesse sont très rarement réalisées. La méthode de la double pesée, ou *méthode de Borda*, permet de faire une pesée exacte, même avec une balance qui n'est pas juste, pourvu que cette balance soit sensible. — Voici en quoi consiste cette méthode :

On place dans l'un des plateaux le corps à peser, et on lui fait équilibre en mettant du sable ou de la grenaille de plomb dans l'autre plateau : c'est ce qu'on appelle faire *la tare* du corps. On enlève ensuite le corps et l'on met des *poids marqués* à sa place, dans le même plateau, jusqu'à ce que l'aiguille revienne s'arrêter au zéro. Lors même que la balance ne serait pas juste, la somme de ces masses échantillonnées représente exactement la masse du corps, puisque le corps et les poids marqués, placés successivement *dans un même plateau*, ont fait équilibre à une même tare placée dans l'autre. — Il importe seulement que la balance soit sensible, afin qu'il n'y ait pas d'indécision quant à la valeur exacte du nombre de poids nécessaire pour rétablir l'équilibre.

C'est toujours à la méthode de la double pesée que l'on a recours, même avec les meilleures balances, quand on veut effectuer une pesée dont on puisse garantir l'exactitude.

69. Balances de précision. — Les balances précises offrent des détails de construction, variables d'un modèle à un autre, et destinés à assurer et à conserver la sensibilité. La figure 48 représente l'une des meilleures dispositions.

La balance est supportée par une colonne de fonte MN, établie sur une caisse reposant sur des vis calantes; la colonne porte à sa partie supérieure un support horizontal C, qui vient (en traversant une ouverture pratiquée dans le fléau) recevoir le couteau sur un plan d'agate. Le fléau a la forme d'un losange évidé; il porte, à ses deux extrémités,

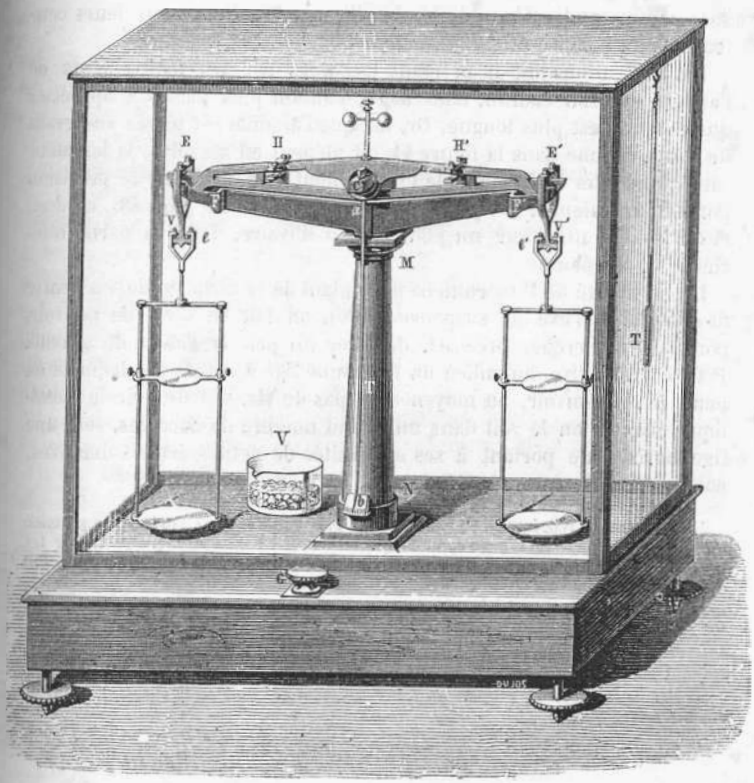


Fig. 48. — Balance de précision.

des couteaux d'acier trempé, sur lesquels s'appuient des étriers E,E destinés à soutenir les plateaux. — Une pièce de fonte FF', qu'on nomme la *fourchette*, peut s'élever ou s'abaisser à volonté, au moyen d'un système de leviers qui est contenu dans la colonne MN, et qu'on met en mouvement par la rotation du bouton G placé hors de la cage. Lorsque, en tournant ce bouton dans un sens convenable, on fait monter la fourchette, elle saisit d'abord par ses extrémités les étriers

E,E′, qu'elle soulève un peu au-dessus de leurs couteaux; puis, par les deux appendices H,H′, elle soulève le fléau, de façon que le couteau du milieu ne repose plus sur le plan C; aucun des trois couteaux ne peut donc s'émousser par les frottements, quand la balance n'est pas en expérience. — Quand on veut faire une pesée, on fait descendre la fourchette, en tournant le bouton G en sens contraire; elle replace alors successivement le fléau sur le plan C, puis les étriers sur leurs couteaux, et la balance oscille librement (*).

Les oscillations du fléau étant accusées par les mouvements de l'aiguille sur son cadran, elles sont d'autant plus faciles à apprécier que l'aiguille est plus longue. Or, lorsque l'aiguille est placée au-dessus du fléau, comme dans la figure 44, on ne peut en accroître la longueur sans augmenter la hauteur de l'instrument; les balances de précision portent une aiguille *ab*, placée au-dessous du fléau (*fig.* 48), et dont l'extrémité se meut sur un petit cadran d'ivoire, fixé à la partie inférieure de la colonne.

La sensibilité de l'instrument dépendant de la distance de son centre de gravité à l'axe de suspension (66), on fait en sorte de pouvoir, pour les recherches précises, déplacer un peu ce centre de gravité. Pour cela, on fixe, au milieu du fléau, une tige verticale sur laquelle on peut faire mouvoir, au moyen d'un pas de vis, soit une virole métallique, comme on le voit dans un grand nombre de balances, soit une tige horizontale portant à ses extrémités de petites boules massives, comme dans la figure 48 (**).

(*) La figure 48 représente une disposition particulière, dans laquelle le premier étrier E en supporte un second *e*, mobile sur lui autour d'un axe qui passe par les pointes des deux vis V : les mouvements de ces deux étriers, qui s'effectuent respectivement autour de deux axes horizontaux, perpendiculaires entre eux, permettent aux plateaux d'obéir librement à la pesanteur, en quelque point de leur surface qu'on place les poids.

(**) La balance est entourée d'une cage de verre qui la préserve des mouvements dus aux courants d'air. Pour éviter l'oxydation des pièces d'acier, on dessèche l'air intérieur de la cage en y plaçant un vase V qui contient, soit de la chaux vive, soit de l'acide sulfurique.

CHAPITRE II

HYDROSTATIQUE DES LIQUIDES

I. — ÉQUILIBRE DES LIQUIDES. — PRINCIPES FONDAMENTAUX.

70. Corps fluides. — Objet de l'hydrostatique. — Les liquides et les gaz présentent ce caractère commun, que leur forme est indéterminée et dépend de celle de l'enveloppe qui les contient ; leurs molécules peuvent se déplacer les unes par rapport aux autres sous l'influence de forces très petites. Cette propriété, qui les distingue des corps solides, les fait comprendre sous la dénomination commune de *fluides*. — L'hydrostatique a pour objet l'étude des fluides à l'état d'équilibre. Elle se divise en deux parties, l'une relative aux liquides, l'autre relative aux gaz.

Il y a, en effet, entre les liquides et les gaz, comme on l'a vu (26), une différence essentielle. — Une masse déterminée de gaz, introduite dans une enveloppe fermée, se répand dans tout l'espace qui lui est offert ; ce n'est pas seulement sa forme qui varie avec celle de l'enveloppe, mais l'expérience du briquet à air (27) suffit pour montrer que son volume est essentiellement variable avec la pression qu'on lui fait supporter : un gaz est un fluide *compressible et élastique*. — Au contraire, une masse déterminée de liquide, introduite successivement dans des vases de formes diverses, conserve un volume constant ; si ce volume est moindre que la capacité du vase, le liquide présente une *surface libre*, par laquelle il n'est pas en contact avec la paroi du vase. Si une capacité comme celle du briquet à air était entièrement remplie par un liquide, le volume du liquide resterait constant, quelles que fussent les pressions qu'on lui fit supporter : un liquide est un fluide *incompressible* (*).

Dans ce chapitre, nous nous occuperons spécialement de l'équilibre des liquides.

(*) Les liquides sur lesquels peuvent porter nos expériences n'éprouvent, comme il a été dit (26, 2°), que des variations de volume très petites, quand on les soumet à des pressions considérables. Dans ce qui va suivre, on supposera toujours qu'il s'agit d'un liquide idéal, rigoureusement *incompressible*.

71. Principe fondamental de l'hydrostatique ou **principe de la transmission des pressions.** — L'hydrostatique tout entière repose sur le principe suivant, énoncé par Pascal :

Quand un liquide, supposé soustrait à l'action de la pesanteur, est enfermé dans une enveloppe dont la paroi porte, en diverses régions, des pistons mobiles, il ne peut y avoir équilibre que si les forces normales qui pressent extérieurement sur les divers pistons sont proportionnelles à leurs surfaces.

On trouve une confirmation de ce principe dans la *presse hydraulique*, dont la première idée est due à Pascal. — Réduite à sa plus simple expression, cette machine se compose de deux cylindres verticaux A et B (*fig.* 49), de diamètres différents, et communiquant entre eux par un tube CD. Dans chacun des cylindres est placé un piston ; l'intervalle compris entre les deux pistons est entièrement plein d'eau.

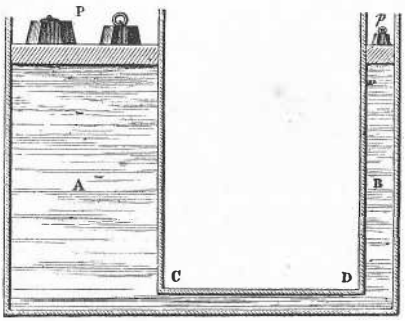


Fig. 49.

Supposons, pour fixer les idées, que la surface du plus grand piston P soit égale à 100 fois celle du petit p. Plaçons sur le petit piston un poids de 4 kilogrammes, par exemple : on reconnaît que le piston P tend à s'élever, et que, pour le maintenir en équilibre, il faut le charger d'un poids 100 fois plus grand, ou 400 kilogrammes. Plus généralement, si l'on désigne par S et S′ les surfaces des deux pistons et par F et F′ les forces qui leur sont appliquées, l'équilibre n'existe que si l'on a $\frac{F}{F'} = \frac{S}{S'}$. — Or la pression exercée extérieurement sur le piston P étant F, la pression sur l'unité de surface de ce piston est $\frac{F}{S}$; de même, la pression sur l'unité de surface du piston P′ est $\frac{F'}{S'}$; ces deux pressions sont égales, puisque l'égalité précédente peut s'écrire $\frac{F}{S} = \frac{F'}{S'}$. On doit donc considérer le liquide comme transmettant au piston P′ la pression qu'il reçoit du piston P, de telle façon que, pour les deux pistons, la pression *sur l'unité de surface* soit la même ; et il en serait évidemment ainsi, en quelque point de la paroi que le second piston fût placé. — Cette expression $\frac{F}{S}$, qui mesure,

pour une portion de paroi prise autour d'un point quelconque, la pression sur l'unité de surface, est ce qu'on appelle *la pression en ce point*.

On peut donc donner, du principe de Pascal, cet autre énoncé équivalent :

Quand un liquide, supposé soustrait à l'action de la pesanteur, est enfermé dans une enveloppe, si l'on exerce, en un point de la surface du liquide, une pression déterminée, cette pression est transmise intégralement par le liquide en tous les points de la paroi.

Si la paroi est courbe, chacun des petits éléments plans, dans lesquels on peut la décomposer par la pensée, doit toujours être considéré comme soumis à une pression qui, pour l'unité de surface, aurait la même expression. — En chaque point, cette force est d'ailleurs toujours *normale* à l'élément considéré; car, si elle était oblique, elle pourrait se décomposer en deux forces, l'une normale, et l'autre située dans le plan même de l'élément; cette dernière aurait pour effet de faire glisser sur la paroi les molécules liquides, c'est-à-dire de rompre l'équilibre.

72. Remarque sur l'application du principe qui précède aux liquides pesants. — Comme on ne saurait soustraire un liquide à l'action de la pesanteur, il n'est pas possible de vérifier le principe de Pascal par une expérience rigoureusement exacte. En réalité, l'action de la pesanteur sur les diverses molécules du liquide produit un accroissement dans la pression sur les parois, accroissement d'autant plus grand que les portions de parois considérées sont situées plus bas. Dans la presse hydraulique, les pressions dues à la pesanteur étant généralement très petites par rapport à celles qui résultent des actions exercées sur les pistons, tout se passe à peu près comme si le liquide n'était pas pesant. Mais, dans les cas où ces deux espèces de pressions sont du même ordre de grandeur, on doit considérer la pression totale, sur une portion de paroi déterminée, comme la somme de la pression due aux *actions extérieures* et de la pression due *au poids du liquide*. — Nous savons calculer la première; nous verrons bientôt comme on évalue la seconde.

73. Égalité de pression dans tous les sens, autour d'un point pris dans l'intérieur d'un liquide en équilibre. — Les pressions que l'on exerce sur la surface d'un liquide, ainsi que les pressions dues à l'action de la pesanteur, se transmettent, non seulement à la paroi du vase, mais encore à tout élément de surface pris dans l'intérieur du liquide.

Pour nous en rendre compte, imaginons un vase CD (*fig.* 50) entièrement rempli par un liquide en équilibre, et supposons que, sur une portion *mn* de la paroi, de surface S, on exerce une force normale F, à l'aide d'un piston A. Soit B un point quelconque, pris dans l'intérieur

du liquide, et soit IH un plan quelconque, mené par ce point. L'équilibre ne sera pas troublé si nous supposons que les molécules liquides comprises dans ce plan viennent à être liées entre elles, de manière à constituer une paroi solide. Mais alors la partie AIHD devient un vase fermé : soit *pq* une portion très petite du plan IH, de surface *s*, et comprenant le point B; sur *pq* s'exerce une force normale *f*. — Si maintenant on rend la mobilité à toutes les molécules, sauf à celles de la portion *pq*, il faut, pour que la surface *pq* reste en équilibre, qu'elle supporte sur son autre face une pression égale et contraire.

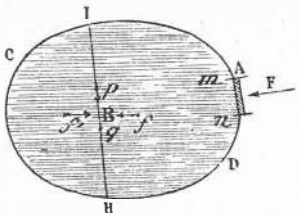


Fig. 50.

Dans le cas idéal d'un liquide non pesant, tout élément de même surface *s* serait soumis à la même force *f*, quelle que fût sa position dans l'intérieur du liquide : d'après le principe de Pascal, la *pression* par unité de surface $\frac{f}{s}$ serait toujours égale à $\frac{F}{S}$. C'est ce qu'on exprime en disant que, *à l'intérieur d'un liquide non pesant, la pression serait la même en tous les points.*

En réalité, quand il s'agit d'un liquide pesant, des éléments de même surface supportent des pressions d'autant plus grandes qu'ils sont situés à une plus grande profondeur. Mais si l'on imagine des éléments de même surface *s*, diversement orientés *autour d'un même point*, ils sont encore sollicités par la même force normale *f*, en sorte que la pression par unité de surface, pour chacun de ces éléments, a encore la même valeur $\frac{f}{s}$. — C'est là ce qu'on exprime en disant que *dans un liquide en équilibre, la pression est la même dans tous les sens autour d'un même point.*

74. Condition d'équilibre d'un liquide pesant. — Égalité de pression en tous les points d'un plan horizontal — Lorsqu'un liquide est en équilibre, soit sous la seule action de la pesanteur, soit sous l'action de la pesanteur et de pressions extérieures, nous allons démontrer que la condition suivante est réalisée :

Dans un liquide pesant en équilibre, la pression est la même en tous les points d'un même plan horizontal.

Soient deux points *m* et *m'*, pris dans un même plan horizontal, à l'intérieur d'un liquide pesant en équilibre ABCD (*fig.* 51). Décrivons, autour du point *m*, dans un plan vertical perpendiculaire à *mm'*, une courbe fermée qui limite un petit élément de surface *s*, et imaginons un cylindre droit ayant pour bases cet élément et un élément égal passant par le point *m'*. Si l'on suppose que toutes les molécules comprises

dans ce cylindre soient liées entre elles de manière à constituer un corps solide, ce solide demeurera évidemment en équilibre, au milieu du liquide environnant, sous l'action de son poids et des pressions que le liquide exerce sur toute sa surface. — Or le poids P du cylindre, perpendiculaire à mm', et les pressions exercées sur les divers éléments de la surface convexe, également perpendiculaires à mm', ne peuvent solliciter le cylindre dans le sens de son axe. Donc, si le cylindre est en équilibre, c'est que les forces f et f' exercées normalement sur les deux bases m et m' sont égales entre elles. — Rendons maintenant la fluidité au cylindre, à l'exception des molécules situées dans les éléments plans m et m' : chacun d'eux sera sollicité, sur ses deux faces, par des forces égales à f; c'est-à-dire que la *pression* (par unité de surface) aux deux points m et m' a la même valeur $\frac{f}{s}$. — C'est ce qu'on exprime en disant que, dans un liquide pesant en équilibre, *la pression est la même en tous les points d'un même plan horizontal.*

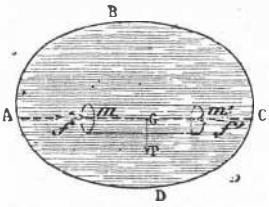


Fig. 51.

75. Différence des pressions en deux points non situés dans un même plan horizontal. — Considérons maintenant, dans une masse liquide, un cylindre droit mn, à arêtes verticales, ayant pour bases deux éléments de surface égaux, d'étendue s (*fig.* 52). Solidifions encore, par la pensée, la partie du liquide qui est comprise dans ce cylindre. Les seules forces qui tendent à déplacer le cylindre dans le sens de son axe sont : le poids P, appliqué au centre de gravité G, et les deux forces f et f', normales aux bases. Puisque l'équilibre existe, la force f', dirigée de bas en haut, doit être égale à la résultante des deux forces f et P dirigées de haut en bas, c'est-à-dire à la somme $f + P$. On a donc $f' - f = P$. En remarquant que la force f' doit être considérée comme appliquée à tout élément de surface s, orienté d'une manière quelconque en un point du plan CD, et que la force f est celle qui serait appliquée à tout élément s pris dans le plan AB, la relation précédente signifie que : *la différence des forces qui pressent deux éléments de surface égaux, pris dans des plans horizontaux différents, est égale au poids d'une colonne cylindrique de liquide ayant pour base l'un des éléments, et pour hauteur la distance de ces deux plans horizontaux.*

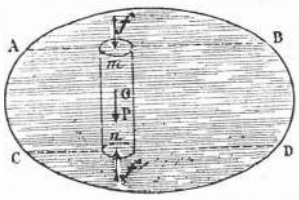


Fig. 52.

On peut donner de cette proposition un autre énoncé. Désignons

par z la distance des deux plans horizontaux AB et CD; désignons par d la densité du liquide ; le volume du cylindre mn est sz; la masse de la colonne liquide mn est szd, et son poids est $P = szdg$. La relation précédente peut donc s'écrire :

$$f' - f = szdg, \quad \text{ou encore} \quad \frac{f'}{s} - \frac{f}{s} = zdg.$$

Or $\frac{f'}{s}$ et $\frac{f}{s}$ sont respectivement les pressions par unité de surface en un point du plan CD, et en un point du plan AB; le produit dg est le poids spécifique du liquide (28). Donc, dans un liquide pesant en équilibre, *la différence des pressions en deux points non situés dans un même plan horizontal a pour mesure le produit de la distance de ces deux plans par le poids spécifique du liquide.*

76. Surfaces de niveau. — Dans un liquide en équilibre, on appelle *surface de niveau* une surface passant par tous les points du liquide où la pression a une même valeur. — Il résulte immédiatement des propositions précédentes que, dans un liquide pesant en équilibre, soumis ou non à des pressions extérieures, *les surfaces de niveau sont des plans horizontaux.*

77. Surface libre d'un liquide pesant. — Vases communicants, contenant un même liquide. — Lorqu'un liquide pesant ne remplit pas entièrement le vase qui le contient, il présente une *surface libre.* Cette surface libre est une surface de niveau; en effet, la pression en tous ses points est nulle, si le vide est fait dans l'enveloppe; si l'enveloppe contient un gaz, ou si elle est en communication avec l'atmosphère, la pression a toujours une même valeur en tous les points de la surface libre. — La surface libre doit donc être *plane et horizontale.*

Il en est encore ainsi lorsque le liquide est contenu dans deux vases

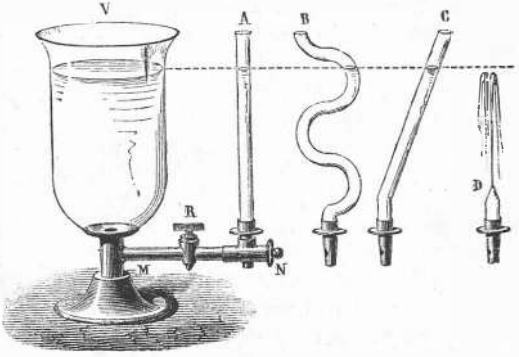


Fig. 53. — Vases communicants.

V et A qui communiquent par leur partie inférieure. — C'est ce qu'on

peut vérifier au moyen de l'appareil représenté par la figure 53 : quand on ouvre le robinet R, l'eau s'élève, dans le vase A, au même niveau que dans le vase V. — Il en sera de même quelle que soit la forme, B ou C, du vase que l'on substituera à A.

78. Liquides superposés. — Vases communicants, contenant deux liquides différents. — Lorsqu'un vase ABCD (*fig.* 54) contient deux liquides non miscibles et de densités différentes, de l'eau et de l'huile par exemple, on voit immédiatement :

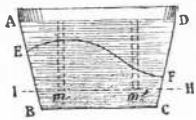


Fig. 54.

1° *Que la surface libre doit être plane et horizontale;*

2° *Que la surface de séparation doit être un plan horizontal;* en effet, si cette surface pouvait affecter une forme telle que EF, il serait impossible que tous les éléments égaux *m*, *m'*..., pris sur un même plan horizontal III et dans le liquide inférieur, fussent toujours également pressés. — Ces conditions étant remplies, pour que l'équilibre subsiste, il faut encore que celui des deux liquides qui a la plus grande densité soit placé à la partie inférieure.

Si maintenant on considère deux vases communicants, et si l'un de ces vases contient deux liquides superposés, il faut, pour qu'il y ait équilibre, *que les hauteurs des liquides dans les deux vases, au-dessus de la surface de séparation, soient en raison inverse de leurs poids spécifiques.* — En effet, prenons un tube en forme d'U, tel que VV' (*fig.* 55); versons-y d'abord une certaine quantité de mercure, puis ajoutons dans le vase V une certaine quantité d'eau : la pression de l'eau déprime le mercure à gauche et le fait monter à droite. L'équilibre étant établi, considérons deux éléments de surface égaux, pris dans le plan AA' qui passe par la surface de séparation des deux liquides, l'un à gauche, dans le vase V, l'autre à droite, dans le vase V' : ces deux éléments doivent supporter la même pression. Or celui de gauche est pressé par le poids d'une colonne d'eau de hauteur AM; celui de droite est pressé par le poids d'une colonne de mercure de hauteur A'N. Mais les poids de volume égaux d'eau et de mercure sont dans le rapport des poids spécifiques de ces deux liquides, c'est-à-dire dans le rapport de 1 à 13,6; pour que les poids de ces deux colonnes de même base soient égaux, il faut donc que les hauteurs AM et A'N soient dans le rapport de 13,6 à 1, c'est-à-dire *en raison inverse des poids spécifiques.* — C'est ce que vérifie l'expérience.

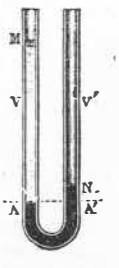


Fig. 55.

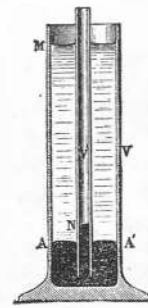


Fig. 56.

L'expérience peut encore être réalisée avec une éprouvette V (*fig.* 56), dans l'axe de laquelle on place un tube de verre ouvert à ses deux extrémités : on verse d'abord du mercure dans l'éprouvette, puis de l'eau à l'extérieur du tube. — On constate que la hauteur de l'eau est égale à treize fois et demie la hauteur du mercure au-dessus de la surface de séparation des deux liquides.

79. Puits ordinaires, puits artésiens, jets d'eau. — C'est dans le principe des vases communicants qu'on trouve l'explication des particularités que présentent les puits ordinaires ou les puits artésiens.

Concevons qu'une masse d'eau un peu considérable A (*fig.* 57), comme

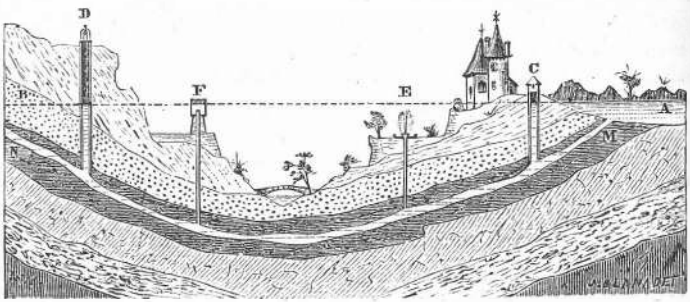


Fig. 57. — Puits ordinaires et puits artésiens.

celle d'un lac ou d'un étang, pénètre dans le sol au travers de couches sablonneuses ou pierreuses, et parvienne ainsi jusque dans l'intervalle de deux couches argileuses imperméables : elle y forme alors une nappe souterraine, comme celle qui est représentée en MN. Si l'on vient à pratiquer des puits en des points du sol tels que C ou D, situés à des niveaux *plus élevés* que A, et qu'on fasse pénétrer ces puits jusqu'à la nappe MN, l'eau s'y élève jusqu'à ce qu'elle atteigne, dans chacun d'eux, au niveau de la surface horizontale A. — Ce sont là les *puits ordinaires*.

Si les points du sol où l'on pratique les puits sont situés *plus bas* que le niveau A, en E ou en F par exemple, l'eau jaillit au-dessus du sol, à une hauteur plus ou moins grande, selon la différence de niveau. — Le plus ordinairement, on adapte, à l'ouverture du puits, un tube surmonté d'un réservoir F, dans lequel l'eau s'élève, et duquel on peut faire partir des conduits pour la distribuer aux environs. — Ces puits portent le nom de *puits artésiens*, parce que c'est dans l'Artois qu'ont été creusés les premiers qui aient été pratiqués en France.

Pour obtenir des *jets d'eau* artificiels, on emploie des dispositions semblables à celle que l'on peut réaliser avec l'appareil de la figure 55, en remplaçant le tube A par le petit tube effilé D. — Le plus souvent,

pour obtenir un jet d'eau, on dispose un réservoir dans un lieu élevé, et on le fait communiquer avec un conduit souterrain qui vient s'ouvrir à la surface d'un bassin situé plus bas.

80. Niveau d'eau. — L'instrument connu, dans l'arpentage, sous le nom de *niveau d'eau*, est aussi fondé sur le principe des vases communicants. Il se compose d'un tube de métal (*fig.* 58), qui est porté par un trépied, et dont les deux extrémités coudées se continuent avec les parois de deux fioles de verre sans fond, M et N. On y verse de l'eau, et l'on fait en sorte que les surfaces du liquide soient visibles dans les deux fioles; le plan MN, qui passe par ces deux surfaces, est horizontal (77).

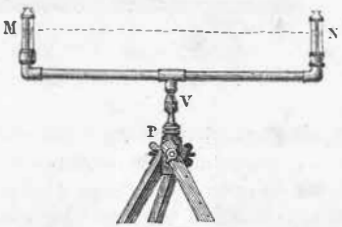


Fig. 58. — Niveau d'eau.

Quand l'arpenteur veut connaître la différence de niveau de deux points B et B′ d'un terrain, il place l'instrument en un point intermédiaire A (*fig.* 59), et fait dresser verticalement en B, par un aide, une

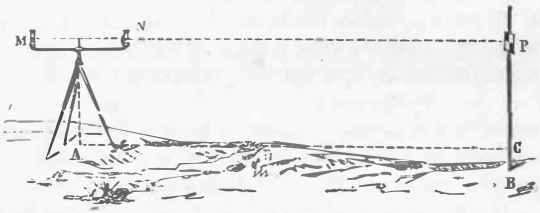


Fig. 59.

longue règle divisée; sur celle-ci se meut une plaque partagée en quatre carrés, dont deux sont peints en blanc, et les deux autres en rouge ou en noir : c'est la *mire* de l'instrument. L'arpenteur, plaçant l'œil en M à la surface du liquide, fait avec la main le signe d'élever ou abaisser la plaque, jusqu'à ce qu'il aperçoive, sur le prolongement du rayon visuel qui rase la surface de l'eau en N, le centre P de la plaque, c'est-à-dire le sommet commun aux quatre carrés : on note alors la hauteur BP mesurée sur la règle. — L'arpenteur fait ensuite transporter la mire au point B′ (supposé à gauche, en dehors de la figure); il détermine de même la position du point P′ qui se trouve dans le même plan horizontal que P, et la hauteur B′P′ de ce point au-dessus du sol. — La différence des hauteurs BP et B′P′ donne la différence de niveau des points B et B′.

81. Niveau à bulle d'air. — On désigne sous le nom de *niveau à*

bulle d'air, un petit instrument (*fig.* 60) qui sert à vérifier l'horizontalité des lignes ou des surfaces sur lesquelles on le place.

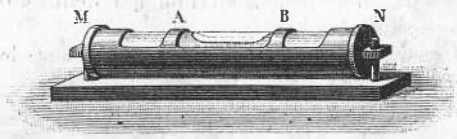


Fig. 60. — Niveau à bulle d'air.

Il consiste en un tube de verre légèrement convexe, dans lequel on a introduit de l'eau ou de l'alcool, en y laissant seulement un espace occupé par une grosse bulle d'air. Ce tube est contenu dans une gaine de cuivre MN, qui est évidée de manière à laisser voir le tube dans la plus grande partie de sa longueur; le tout est fixé sur une plaque métallique. — La bulle d'air se place toujours au point le plus haut, et l'on a réglé l'instrument de manière que, si la plaque est bien horizontale, les deux extrémités de la bulle viennent correspondre à deux bandes transversales de cuivre, A, B, appliquées sur le tube et servant de *repères*.

Supposons que l'on veuille faire usage de cet instrument pour vérifier l'horizontalité d'une surface plane, la surface d'une table, par exemple. — On placera le niveau sur cette table, parallèlement à l'un des bords. Si cette direction est horizontale, la bulle d'air viendra se placer exactement entre les deux repères. Au contraire, pour peu que cette direction soit inclinée, la bulle se portera du côté le plus élevé, et l'on devra relever progressivement la table du côté opposé, au moyen de cales par exemple, jusqu'à ce que la bulle arrive entre les repères et s'y maintienne immobile. — Ce résultat étant atteint, on répétera la même opération pour une direction perpendiculaire à la précédente (*). — Lorsque le réglage aura été effectué pour ces deux directions, on sera certain que la surface de la table est horizontale.

II. — PRESSIONS SUR LES PAROIS DES VASES.

82. Pression exercée par un liquide pesant sur le fond horizontal d'un vase. — Prenons, sur le fond horizontal d'un vase ABCD (*fig.* 61), un élément de surface *mn*, et sur la surface libre un élément *m'n'* de surface égale; la force qui presse sur *mn* surpasse la pression en *m'n'* (75) d'une quantité égale au poids d'une colonne cylindrique de liquide, ayant pour base *mn* et pour hauteur la distance de la surface libre AD au fond BC du vase. — Décomposons maintenant la paroi

(*) On devra avoir soin, dans cette seconde opération, de ne pas changer ce qui aura été fait dans la première; c'est-à-dire que, s'il est nécessaire d'employer de nouvelles cales, elles ne devront être placées que sous les pieds auxquels on n'aura pas touché précédemment. S'il en était autrement, on devrait recommencer la première opération après la seconde.

horizontale BC en éléments tels que *mn*: les pressions que supportent ces éléments se composeront en une seule, égale à leur somme. Donc :

La pression exercée par un liquide pesant, sur le fond horizontal du vase qui le contient, est égale au poids d'une colonne cylindrique de ce liquide, ayant pour base la surface du fond et pour hauteur la distance du fond au plan de la surface libre.

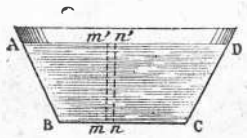


Fig. 61.

83. Vérification expérimentale. — D'après l'énoncé qui précède, si l'on considère trois vases comme ceux de la figure 62, l'un A cylindrique, le deuxième B élargi, le troisième C rétréci à la partie supérieure, si ces trois vases ont des *fonds égaux* et qu'ils contiennent *un même liquide*, s'élevant à *une même hauteur* au-dessus du plan du fond, les pressions doivent être égales sur les trois fonds. — Ce résultat peut être vérifié à l'aide d'une disposition qui a été indiquée par A. Masson, et qui est une modification d'un appareil imaginé par Pascal.

Trois vases A, B, C, sans fond (*fig.* 62), de formes différentes, mais

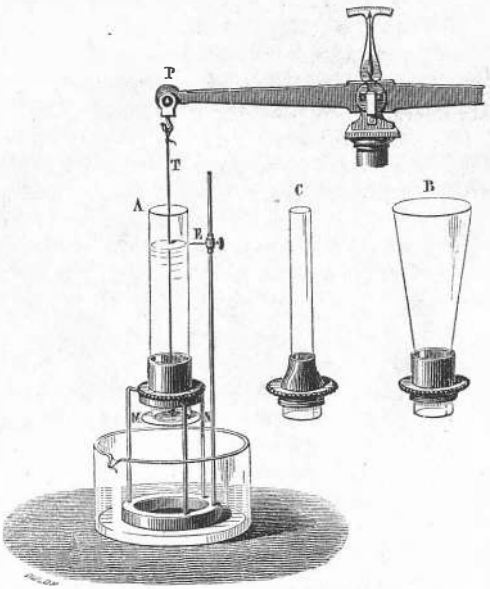


Fig. 62. — Pression sur le fond des vases.

présentant à leur partie inférieure des ouvertures égales, peuvent se visser sur un trépied métallique. L'un d'eux A étant installé sur ce tré-

pied, on applique sur son ouverture inférieure un *obturateur* MN, c'est-à-dire un disque de verre plan, qu'on suspend par un fil T à l'un des bras d'une balance : on place ensuite des corps pesants dans le plateau qui est suspendu à l'autre bras, de manière à appliquer, avec une certaine force, l'obturateur sur l'ouverture. On verse alors de l'eau dans le vase, jusqu'à ce que l'obturateur laisse échapper quelques gouttes de liquide; à ce moment, la pression exercée par l'eau de haut en bas, sur ce fond mobile, est égale en grandeur à la force avec laquelle il est maintenu contre l'ouverture; on marque alors le niveau de l'eau au moyen du petit index E, mobile le long d'une tige verticale. — On remplace ensuite successivement le vase A par les vases B et C, sans toucher à l'index : l'expérience montre que l'obturateur se détache toujours au moment où le liquide atteint le même niveau.

La pression est donc *la même sur le fond des trois vases;* quant à sa valeur, on peut la déterminer en plaçant sur l'obturateur, au lieu d'eau, des poids marqués : on trouve que la somme des poids nécessaires pour le détacher est précisément égale au poids de l'eau qu'on avait dû verser dans le vase *cylindrique* A. — Il en résulte que, pour le vase élargi B, la pression exercée sur le fond est inférieure au poids de l'eau que contient ce vase; dans le vase rétréci C, la pression sur le fond est supérieure au poids de l'eau.

84. Pressions sur les parois latérales. — L'existence des pressions sur les parois latérales peut se démontrer par l'expérience, en pratiquant des ouvertures dans la paroi d'un vase : le liquide s'échappe, par chaque ouverture, en formant un jet qui est d'abord normal à la portion de paroi supprimée, et qui s'infléchit ensuite sous l'influence de la pesanteur.

Pour évaluer cette pression, prenons, sur une paroi latérale d'un vase ABCD (*fig.* 63), un élément de surface *mn*, assez petit pour qu'on puisse toujours le considérer comme plan, et pour qu'on puisse regarder tous ses points comme étant à égale distance de la surface libre. Cet élément éprouve, de la part du liquide, une pression normale à sa surface, et égale au poids d'une colonne cylindrique droite de liquide, ayant pour base *mn* et pour hauteur la distance de cet élément au plan de la surface libre.

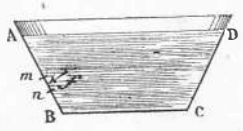


Fig. 63.

Si, au lieu d'un élément infiniment petit, on considère une portion *plane et finie* de paroi latérale, chacun de ses éléments supporte une pression normale : toutes ces pressions ont donc une *résultante*, normale à la paroi, et *égale à leur somme.* — On démontre, en Mécanique, que cette résultante est égale au poids d'une colonne cylindrique droite de liquide, ayant pour base la portion de paroi considérée, et pour hauteur la distance de son centre de gravité au plan de la surface

libre. Elle est appliquée en un point qu'on appelle le *centre de pression :* ce point est toujours situé plus bas que le centre de gravité de la portion de paroi elle-même.

85. Pression de bas en haut, sur une portion horizontale de la paroi. — D'après ce qui précède, une paroi horizontale, en contact *par sa face inférieure* avec un liquide dont la surface libre est à un niveau plus élevé, doit éprouver une pression de bas en haut, égale au poids d'une colonne de liquide ayant pour base cette surface et pour hauteur la hauteur du liquide au-dessus d'elle. — Pour le vérifier, on prend un large tube de verre, fermé à la partie inférieure par un disque plan *ab* (*fig.* 64) que l'on maintient d'abord au moyen d'un fil fixé en son centre. Si l'on enfonce ce tube verticalement dans l'eau, le disque éprouve de bas en haut une pression qui l'applique contre l'ouverture, car on peut abandonner le fil sans que le disque se détache. — Pour déterminer expérimentalement la valeur de cette pression, on versera de l'eau dans le tube, et l'on constatera que le disque se détache au moment où le niveau intérieur arrive dans le plan du niveau extérieur. Or, à ce moment, l'intérieur du tube constitue un vase sur le fond duquel s'exerce une pression que nous savons évaluer (82). La pression qui s'exerce de bas en haut sur *ab* lui est équivalente : elle est donc égale au poids d'une colonne cylindrique de liquide, ayant pour base *ab* et pour hauteur la distance de *ab* au niveau de la surface libre.

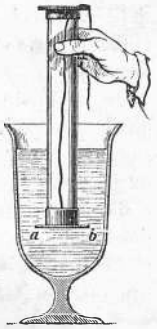


Fig. 64.

86. Résultante des pressions sur toute la paroi du vase. — Paradoxe hydrostatique. — Supposons que l'on porte successivement, sur l'un des plateaux d'une balance, trois vases semblables aux vases A, B, C (*fig.* 62), et contenant de l'eau jusqu'à une même hauteur; négligeons, pour plus de simplicité, les poids des vases eux-mêmes, dont il serait d'ailleurs facile de tenir compte. La pression qu'exerce le liquide, sur le fond qui repose sur le plateau de la balance, est la même pour chacun de ces trois vases, et cependant il est évident qu'il faudrait, pour leur faire équilibre, placer dans l'autre plateau de la balance des poids différents. — Cette apparente contradiction, connue sous le nom de *paradoxe hydrostatique*, disparaît quand on a égard à l'ensemble des pressions que le liquide exerce sur les parois.

Il est facile de voir, en effet, que les forces appliquées aux différents éléments d'une paroi telle que AB (*fig.* 65), qui fait un angle obtus avec le fond, peuvent se décomposer chacune en deux forces, l'une horizontale f_1 et l'autre verticale f_2; les composantes verticales s'ajoutent à la pression exercée sur le fond, et se transmettent, par la paroi solide, au plateau de la balance. Le plateau supporte donc une

pression plus grande que celle qui s'exerce sur le fond de ce vase. — Sur une paroi A'B', faisant un angle aigu avec le fond, chaque pression élémentaire (*fig.* 66) se décompose en une force horizontale f_1 et en une force verticale f_2 dirigée en sens contraire de la pesanteur; donc la pression supportée par le plateau de la balance n'est que la différence entre la pression supportée par le fond du vase et la résultante des forces f_2.

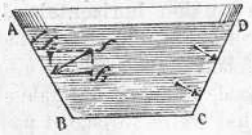


Fig 65.

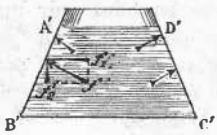


Fig. 66.

On complète cette explication, en Mécanique, en démontrant que, quelle que soit la forme du vase, toutes les pressions élémentaires supportées par l'ensemble des parois *ont une résultante unique, égale au poids du liquide contenu dans le vase.*

87. Tourniquet hydraulique. — Considérons un vase ABCD (*fig.* 67), dont nous supposerons, pour plus de simplicité, les deux parois AB et CD planes, verticales et parallèles. Prenons, sur l'une de ces parois, une portion *mn* pour base d'un cylindre droit; ce cylindre découpe sur la paroi CD une portion *m'n'* égale à *mn*. Les pressions que le liquide exerce sur *mn* et sur *m'n'* sont

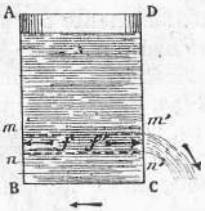


Fig. 67.

deux forces *f* et *f'* égales et contraires, qui se font équilibre; mais si l'on vient à enlever la portion de paroi *m'n'*, la force *f'* a pour effet de faire jaillir le liquide, tandis que la force *f* tend à imprimer au vase un mouvement de *recul*, en sens contraire de l'écoulement. — C'est ce que l'on peut constater, en plaçant le vase sur un petit chariot mobile.

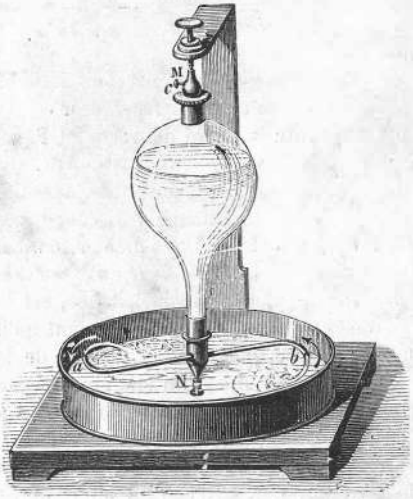


Fig. 68. — Tourniquet hydraulique.

Le *tourniquet hydraulique* (*fig.* 68) est fondé sur le même principe. — Un réservoir de verre MN, rempli d'eau, est disposé de manière à pouvoir tourner autour d'un axe vertical : il communique, à sa partie inférieure, avec un tube *ab*, qui a la forme d'un Z très allongé. — A l'instant où l'eau s'échappe par les extrémités de ce tube, l'appareil prend un mouvement de rotation, en sens contraire de l'écoulement.

III. — PRINCIPE D'ARCHIMÈDE.

88. Principe d'Archimède. — *Tout corps plongé dans un liquide éprouve une poussée, de bas en haut, égale en grandeur au poids de liquide déplacé.*

Ce principe peut se démontrer par le raisonnement suivant. — Considérons un liquide en équilibre, et supposons qu'une portion MN de ce liquide (*fig.* 69) vienne à se solidifier, sans changer de poids ni de volume ; le corps solide ainsi formé demeurera en équilibre au milieu du liquide. Or, les forces qui le sollicitent sont, d'une part, son poids P, appliqué à son centre de gravité G ; d'autre part, les forces telles que *f*, *f*, que le liquide exerce normalement sur chacun des éléments de la surface du corps. Puisque toutes ces forces se font équilibre, les forces *f* ont une résultante, qui est égale et directement opposée au poids P. Or, toutes les forces *f* conserveront les mêmes valeurs, si l'on remplace ce solide idéal par un corps solide réel, de même forme, mais de nature quelconque : elles ont donc toujours une résultante, et cette résultante, que nous nommerons la *poussée*, est une force dirigée de bas en haut, égale en grandeur au poids de la masse liquide dont le corps tient la place, et passant par le centre de gravité de cette masse liquide elle-même.

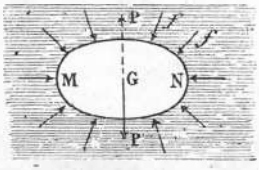


Fig. 69.

89. Vérification expérimentale. — Pour vérifier le principe d'Archimède, on fait l'expérience suivante. — On prend deux cylindres, l'un plein D (*fig.* 70), l'autre creux C, travaillés de manière que le volume du cylindre plein soit exactement égal à la capacité du cylindre creux, (ce dont on peut s'assurer en constatant que le premier entre exactement dans le second). On suspend, sous l'un des plateaux A d'une balance hydrostatique (*), le cylindre creux, et, au-dessous de lui, le cylindre plein ; puis, on fait équilibre à ce système au moyen d'une tare, placée dans l'autre plateau B. — Cela fait, on introduit au-dessous

(*) On appelle *balance hydrostatique*, une balance dont on peut faire monter ou descendre le fléau, au moyen d'une crémaillère contenue dans la colonne qui supporte l'instrument. Cette disposition est commode pour introduire dans l'eau les corps que l'on a suspendus à l'un des plateaux.

du cylindre D un vase contenant de l'eau, et l'on fait en sorte que le cylindre y plonge complètement. La poussée exercée par l'eau sur le cylindre D fait incliner la balance de l'autre côté. Mais on constate que,

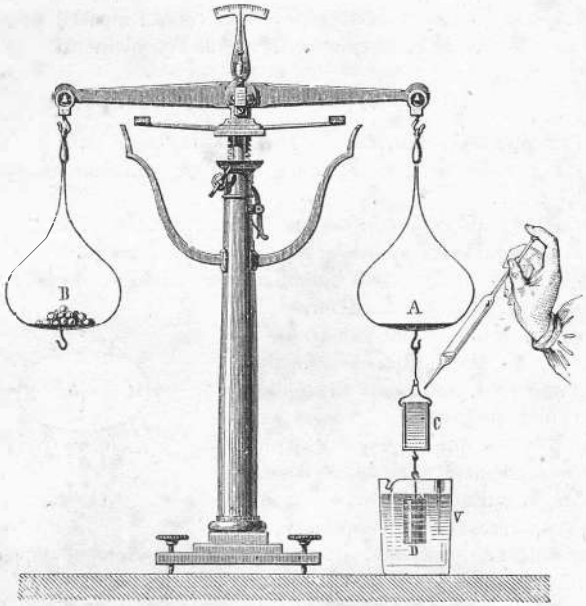


Fig. 70. — Vérification du principe d'Archimède.

pour ramener le fléau à la position horizontale, il suffit de remplir d'eau le cylindre creux C; on fait donc équilibre à la poussée, en ajoutant, du même côté, un poids d'eau *égal à celui de l'eau déplacée*.

90. Poids apparent d'un corps complètement plongé dans un liquide. — D'après le principe d'Archimède, un corps solide MN plongé dans un liquide (*fig.* 71), est soumis : 1° à l'action de la poussée P, qui est une force verticale dirigée de bas en haut, égale en grandeur au poids de la partie du liquide dont ce corps tient la place, et appliquée au centre de gravité G de cette partie elle-même; 2° à l'action de son poids P′, qui peut être considéré comme appliqué au centre de gravité G′ du corps solide.

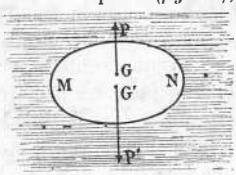


Fig 71.

Supposons que le corps soit *homogène*, c'est-à-dire que, à des volumes égaux, pris en différents points de sa masse, correspondent toujours des poids égaux : alors, si le corps est

complètement plongé, son centre de gravité G′ coïncide avec le centre de gravité G du liquide déplacé; par suite, les deux forces P′ et P, appliquées en un même point et directement opposées, ont une résultante égale à leur différence P′ — P, et dirigée de haut en bas si cette différence est positive. Cette résultante est ce qu'on appelle le *poids apparent* du corps dans le liquide. — Si le corps n'est pas homogène, il s'oriente, sous l'action des forces P′ et P, de manière que G′ et G se placent sur une même verticale; dans cette position, les forces P′ et P ont encore une résultante, et, si P′ est plus grand que P, le *poids apparent* du corps est encore une force P′ — P, dirigée de haut en bas. — On dit quelquefois que le corps *perd une partie de son poids*, égale au poids du liquide déplacé : c'est là une locution peu correcte, mais dont le sens n'offre pas d'ambiguïté.

Si le poids P′ du corps est égal au poids P du liquide déplacé, le poids apparent du corps est nul, c'est-à-dire qu'il se tient en équilibre de lui-même au milieu du liquide.

Enfin, si la poussée P est plus grande que le poids P′ du corps, le poids apparent P′ — P est négatif, c'est-à-dire que le corps est sollicité par une forte résultante qui tend à le faire mouvoir *de bas en haut* dans le liquide. C'est ce qu'on observe pour le liège, le bois, plongés dans l'eau; pour le fer plongé dans le mercure, etc. — Lorsqu'il en est ainsi, et que le liquide présente une surface libre, le mouvement ascendant du corps l'amène, comme nous allons le voir, à une position d'équilibre.

91. Équilibre des corps flottants. — Lorsqu'un corps, sollicité par une poussée plus grande que son poids, arrive à la surface libre du liquide dans lequel il est plongé, une portion de plus en plus grande de ce corps émerge successivement du liquide; par suite, la poussée acquiert des valeurs successivement décroissantes : il arrive donc un moment où la poussée devient égale au poids du corps, et peut lui faire équilibre. — L'expérience montre, en effet, que l'équilibre s'établit toujours; on dit alors que le corps *flotte* à la surface du liquide.

Si l'on désigne par p la valeur actuelle de la poussée, due à la partie qui reste plongée lorsque l'équilibre est établi, on peut dire : 1° que la poussée p et le poids P′ du corps sont appliqués en des points G et G′ qui sont dans la direction même de ces forces, c'est-à-dire *sur une même verticale;* 2° que ces deux forces sont *égales* entre elles. — C'est surtout cette seconde remarque qu'il importe de retenir; elle peut s'énoncer comme il suit :

Toutes les fois qu'un corps flotte à la surface d'un liquide, son poids est égal à celui du liquide que déplace la portion plongée.

92. Ludion. — On réalise, au moyen du *ludion* (*fig.* 72), les conditions diverses dans lesquelles un corps solide descend, monte, ou se tient en équilibre dans un liquide. — Dans une éprouvette pleine d'eau,

on a introduit une boule de verre creuse B, percée vers sa partie inférieure d'une petite ouverture capillaire (placée à gauche sur la figure); cette boule supporte une figurine d'émail, dont le poids a été réglé de façon que, la boule étant vide, le système ait un poids total moindre que celui de l'eau déplacée, et monte à la surface du liquide. Une membrane, fixée sur le bord de l'éprouvette, permet d'exercer, avec le doigt, une pression sur la surface de l'eau; cette pression, se transmettant dans le liquide, fait pénétrer dans la boule une certaine quantité d'eau, qui comprime l'air intérieur, en sorte que le poids du système se trouve augmenté du poids de cette eau : dès que le poids total est devenu supérieur à la poussée, le ludion descend. — Si l'on vient à supprimer la pression, la force élastique de l'air chasse de la boule l'eau qui y était entrée, et le ludion remonte. — Enfin, on peut régler la pression de manière que la boule se tienne en équilibre au milieu du liquide, le poids total du système étant alors égal à la poussée.

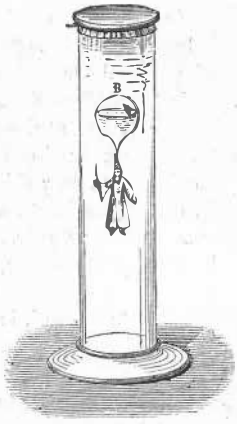


Fig. 72. — Ludion.

IV. — CAPILLARITÉ.

93 Phénomènes capillaires. — On désigne sous le nom de *phénomènes capillaires* des phénomènes qui paraissent en opposition avec les lois de l'équilibre des liquides, et qu'on observe particulièrement dans les tubes dont le diamètre est, jusqu'à un certain point, comparable à celui d'un cheveu.

Lorsqu'on plonge un tube de verre AB (*fig.* 73), d'un diamètre suffi-

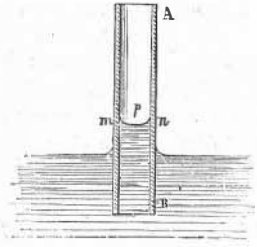


Fig 73.

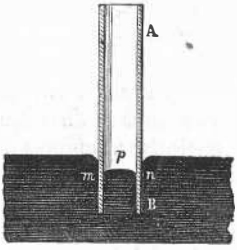


Fig. 74.

samment petit, dans l'eau ou dans un liquide quelconque *capable de mouiller le verre*, on voit le liquide s'élever dans ce tube plus haut

qu'à l'extérieur. La surface courbe *mpn*, dans le tube capillaire, forme alors ce qu'on appelle un *ménisque concave*.

Si l'on fait la même expérience avec du mercure, ou en général avec un liquide *qui ne mouille pas le verre*, ce liquide est déprimé à l'intérieur du tube, au-dessous du niveau extérieur (*fig.* 74); sa surface est alors un *ménisque convexe*.

On remarque, en outre, dans le premier cas, que le liquide se relève au contact de la paroi *extérieure* du tube; dans le second, qu'il se déprime dans le voisinage de cette paroi.

Nous ne pouvons entrer ici dans le développement des considérations qui permettent de faire disparaître le désaccord apparent entre les phénomènes capillaires et les lois de l'hydrostatique. — Nous nous bornerons à indiquer les lois expérimentales de l'ascension ou de la dépression des liquides dans les tubes capillaires.

94. Ascensions capillaires. — *Pour un même liquide, les hauteurs des colonnes soulevées, dans divers tubes capillaires, sont en raison inverse des diamètres de ces tubes.*

Gay-Lussac a vérifié cette loi par l'expérience suivante. Un large vase V (*fig.* 75) contient le liquide sur lequel on opère; il repose sur un plateau muni de vis calantes, qui permettent de rendre le bord du vase horizontal. Dans la plaque métallique AB sont assujettis des tubes capillaires, *t*, *t'*, *t''*, de différents diamètres. Les diamètres de ces tubes ont été préalablement mesurés, en pesant le mercure qui occupe dans le tube une longueur déterminée. — Pour mesurer les ascensions, on a assujetti à la plaque AB une vis à deux pointes CC', dont la pointe inférieure C' est amenée à l'affleurement de la partie plane de la surface liquide dans le vase : la hauteur verticale de la vis tout entière a été déterminée avant l'introduction du liquide. On mesure successivement, au cathétomètre, les distances verticales de la pointe supérieure C au point le plus bas de chacun des ménisques *m*, *m'*, *m''*.

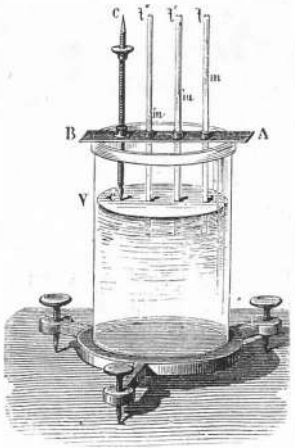


Fig. 75.

95. Influence de la nature des liquides — Les expériences montrent que, *dans un même tube, l'ascension capillaire dépend essentiellement de la nature du liquide.*

Dans un tube de 1 millimètre de diamètre, par exemple, on trouve que l'eau s'élève à $30^{mm},7$; l'alcool, à $12^{mm},1$; l'éther, à $10^{mm},8$; le sulfure de carbone, à $10^{mm},2$.

96. Dépressions capillaires — Les dépressions capillaires sont soumises à des lois semblables. — Les expériences de vérification ont été faites principalement sur le mercure. On mastique, aux deux extrémités d'un tube de fer deux fois recourbé *abc* (*fig.* 76), d'une part une large cuvette de verre D, et, d'autre part, le tube de verre capillaire soumis à l'expérience. On introduit du mercure dans ces deux vases communicants, et on détermine, au cathétomètre, la distance verticale des deux niveaux *m* et *n*.

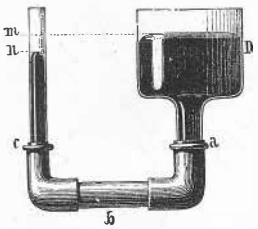


Fig. 76.

97. Effets divers dus à la capillarité. — L'eau, l'alcool, l'éther, etc., s'élèvent, entre deux lames parallèles (*fig.* 77), à une hauteur d'autant plus grande que ces lames sont plus rapprochées. L'ascension est *la moitié* de ce qu'elle serait dans un tube d'un diamètre égal à l'écartement des lames.

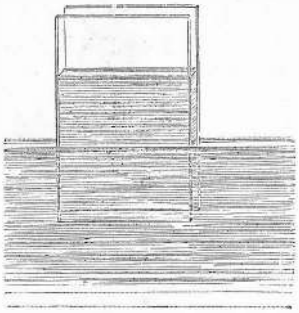


Fig. 77.

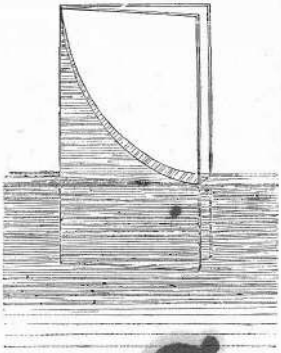


Fig. 78.

Entre des lames de verre se touchant par un de leurs bords verticaux (*fig.* 78), le liquide s'élève, dans l'espace angulaire qu'elles comprennent, d'autant plus haut que l'on considère des points plus voisins de l'arête de contact.

La capillarité explique l'ascension des liquides dans les canaux des corps poreux. — Elle joue un rôle important, comme l'a montré Jamin, dans les mouvements de la sève chez les végétaux.

mination du *poids p* du même volume d'eau (plus exactement sa *masse*). — On fera ensuite le quotient de P par *p* :

$$D = \frac{P}{p}.$$

Quant à l'usage que l'on pourra faire de ce nombre D, le plus fréquent consiste à déterminer le poids, ou plutôt la masse, d'un corps dont on connaît la densité et le volume, sans avoir recours à une pesée directe. — Puisque le nombre D représente, en grammes, la masse d'un centimètre cube de la substance, si l'on désigne par V son volume en centimètres cubes, la masse du corps sera exprimée, en grammes, par le produit VD.

99. Remarque relative aux tables de poids spécifiques ou densités. — Pour fixer avec précision la signification du nombre qui représentera le poids spécifique relatif ou la densité de chaque corps, il est nécessaire de définir les conditions dans lesquelles le corps est supposé placé, et en particulier sa température. Il est clair, en effet, que, le volume d'un corps étant variable avec sa température, le poids ou la masse de *la partie comprise dans un centimètre cube* dépend de la température du corps lui-même. — Dans les tables numériques, comme celle de la page 83, les corps solides ou liquides sont supposés *à la température de* 0°. On verra, dans l'étude de la Chaleur, comment on en peut déduire, pour chaque corps, la densité à une température quelconque.

II. — DÉTERMINATION EXPÉRIMENTALE DES DENSITÉS DES CORPS SOLIDES ET LIQUIDES.

100. Méthode du flacon. — *Corps solides.* — Les flacons destinés à déterminer les densités des corps solides sont de formes diverses : lorsqu'on veut opérer sur des corps en gros fragments, on se sert de flacons à large goulot (*fig.* 79), dont le bord a été usé à l'émeri, de façon qu'un disque de verre plan puisse s'y appliquer exactement. Quand le flacon aura été rempli d'eau, on fera glisser le disque sur le goulot, de manière à chasser le liquide qui pourrait dépasser le bord du flacon, en prenant une forme convexe.

Pour déterminer la densité d'un corps solide insoluble dans l'eau, d'un fragment de marbre par exemple, on le met dans l'un des plateaux A de la balance, et l'on place à côté le flacon rempli d'eau et fermé par son obturateur; on fait équilibre avec une tare placée dans l'autre plateau. On enlève alors le corps et on le remplace par des poids marqués, ce qui donne son poids P, par double pesée (68). — On retire ensuite les poids marqués et l'on introduit le fragment de marbre

dans le flacon : il sort une certaine quantité d'eau ; on replace l'obturateur, on essuie le flacon et on le remet dans le plateau A. L'équilibre ne peut subsister, puisque le corps a chassé un volume d'eau égal au sien : les poids marqués qu'on doit ajouter en A représentent le poids de cette eau, c'est-à-dire p, avec l'exactitude de la double pesée. — Le quotient de P par p est la densité du marbre.

Fig. 79.

Fig. 80

Pour opérer sur des corps en petits fragments ou en poudre, on emploie de petits flacons à goulot étroit (*fig.* 80), dont le bouchon *ab* est formé d'un tube effilé, usé à l'émeri en *b* de façon qu'il s'enfonce d'une quantité toujours égale dans le goulot. Lorsqu'on a rempli d'eau le flacon et qu'on introduit le bouchon, il sort une certaine quantité de liquide par l'ouverture *a*, et, comme la surface libre de l'eau a un diamètre très petit, il n'importe pas qu'elle soit plane ou courbe. — On opère comme avec le flacon précédent : il faut remarquer seulement que les corps en poudre peuvent, lorsqu'on les introduit dans l'eau, entraîner les bulles d'air qui se dégagent difficilement : pour chasser ces bulles d'air, on place le flacon sous le récipient de la machine pneumatique, et on le laisse quelque temps dans le vide.

Fig. 81.

101. *Corps liquides.* — On se sert ordinairement, pour les liquides, de petits flacons dont l'usage a été introduit par Regnault. La figure 81 représente un de ces flacons : il se compose d'un réservoir cylindrique R, surmonté d'un petit tube capillaire portant un trait de repère *a*, et d'une autre partie cylindrique C qui sert d'entonnoir. Un bouchon de verre B empêche l'évaporation des liquides volatils pendant les pesées. Lorsqu'on a rempli le flacon d'un liquide (*), on enlève, avec un petit rouleau de papier buvard, tout ce qui dépasse le trait *a* marqué sur le tube.

Pour déterminer la densité d'un liquide, on place le flacon plein de ce liquide dans l'un des plateaux de la balance, et l'on établit l'équilibre en faisant une tare dans l'autre plateau. Puis, on vide le flacon,

(*) Le tube *a* étant capillaire, il faut, pour introduire le liquide, employer un procédé particulier, semblable à celui qui sera indiqué plus loin pour la construction du thermomètre.

on le sèche, et on le replace dans le même plateau; les poids marqués qu'il faut ajouter, du même côté, pour rétablir l'équilibre, expriment le poids P du liquide que contenait le flacon — La même opération, faite avec de l'eau, donne le poids p d'un égal volume d'eau. — Il suffit de diviser P par p pour avoir la densité du liquide.

102. Méthode de la balance hydrostatique — *Corps solides.* — La méthode de la balance hydrostatique est fondée sur ce principe, qu'un corps plongé dans un liquide éprouve une poussée, de bas en haut, égale en grandeur au poids du liquide déplacé (88).

Pour déterminer la densité d'un corps solide, insoluble dans l'eau, d'un fragment de bronze, par exemple, on l'accroche, par un fil métallique fin, à l'un des plateaux A de la balance (*fig.* 82), et on lui fait équilibre avec une tare placée dans l'autre plateau; on enlève le corps, et l'on rétablit l'équilibre en plaçant des poids marqués dans le plateau A : on connaît ainsi le poids P du corps, par la méthode même de la double pesée (68). — Après avoir enlevé les poids marqués, on accroche de nouveau le corps sous le plateau, et on le descend dans l'eau; l'équilibre étant détruit, on le rétablit en plaçant des poids marqués dans le plateau A. — Ces poids expriment le poids p de l'eau déplacée, indépendamment de la justesse de la balance. — On divise P par p, et le quotient est la densité cherchée.

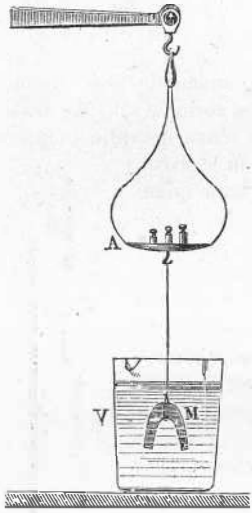


Fig. 82.

103. *Corps liquides.* — Pour déterminer la densité d'un *corps liquide*, d'un alcool, par exemple, on suspend par un fil fin, à l'un des plateaux A de la balance, un corps solide quelconque, par exemple une boule de verre convenablement lestée, et l'on en fait la tare. On plonge alors cette boule dans l'alcool, et, pour rétablir l'équilibre, on place dans le plateau A des poids marqués, qui représentent le poids P de l'alcool déplacé. — En plongeant ensuite la boule dans l'eau pure, on connaît, par les poids qu'il faut placer dans le plateau A pour rétablir l'équilibre, le poids p du même volume d'eau. — En divisant P par p, on obtient la densité de l'alcool.

104. Méthode de l'aréomètre de Nicholson. — L'aréomètre de Nicholson (*fig.* 83) se compose d'un cylindre métallique creux A, terminé en haut et en bas par deux cônes : le cône supérieur porte une tige métallique et un plateau; au cône inférieur est suspendue une corbeille lestée par de la grenaille de plomb.

Pour déterminer la densité d'un corps solide, d'un fragment de soufre, par exemple, on met l'instrument dans l'eau, on place le corps sur le plateau B, et l'on ajoute de la grenaille de plomb de façon que l'instrument s'enfonce jusqu'à un trait d'affleurement *a* marqué sur la tige; puis on remplace le corps par des poids marqués, de manière à produire de nouveau l'affleurement; on connaît ainsi le poids P du corps, comme on l'obtiendrait avec une balance, mais avec une sensibilité moindre, à cause de l'adhérence de l'eau pour les parois de l'instrument. — On retire alors ces poids, et l'on place le morceau de soufre sur la corbeille C; le corps, étant plongé dans l'eau, éprouve une poussée, en sorte que, pour rétablir l'affleurement, il faut placer des poids marqués sur le plateau B; ils expriment le poids d'un volume d'eau égal à celui du soufre. — Le quotient de P par *p* est la densité cherchée.

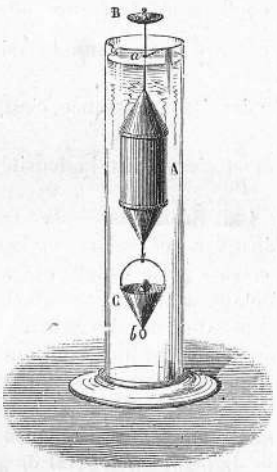


Fig. 83.
Aréomètre de Nicholson.

Lorsqu'on opère sur des corps dont la densité est moindre que celle de l'eau, la poussée tendrait à les faire remonter à la surface : on retourne alors la corbeille, et on l'accroche par l'anneau *b*; la poussée presse le corps dans la concavité de la corbeille, et la méthode s'applique sans autre modification.

Cette méthode de l'aréomètre, qui n'exige pas l'usage de la balance, est surtout employée par les minéralogistes. L'instrument est commode, en ce qu'il est portatif; on l'enferme dans un étui de fer-blanc, qui peut tenir lieu, en voyage, de l'éprouvette dans laquelle on fait flotter l'aréomètre (*).

105. Corps solides solubles dans l'eau. — Aucune des méthodes précédentes n'est immédiatement applicable aux corps solides qui sont *solubles dans l'eau*. — Si ces corps ne sont pas solubles dans l'essence

* On a construit, pour déterminer la densité des liquides, un instrument analogue, l'aréomètre de Fahrenheit, dont on fait d'ailleurs assez rarement usage. Il est en verre et lesté par du mercure placé dans une petite boule, à sa partie inférieure.

L'instrument a été pesé une fois pour toutes; soit, par exemple, 50 grammes son poids. — On le plonge dans le liquide dont on veut déterminer la densité, et l'on ajoute des poids marqués sur le plateau supérieur, de manière à le faire s'enfoncer jusqu'au trait d'affleurement. Puisque l'instrument flotte, la poussée qu'il éprouve est égale à son poids total, c'est-à-dire à la somme de 50 grammes et des poids placés sur le plateau : cette somme exprime donc le poids P d'un volume du liquide égal au volume de la partie plongée. — De même l'instrument étant plongé dans l'eau : la somme de 50 grammes et des poids qui déterminent l'affleurement représente le poids *p* d'un égal volume d'eau. — Le quotient de P par *p* exprime la densité du liquide.

de térébenthine, on opère avec ce liquide comme on l'aurait fait avec l'eau, ce qui donne la densité du corps *par rapport à l'essence :* il est facile de voir qu'il suffit de multiplier ensuite ce nombre par la densité de l'essence par rapport à l'eau.

En effet, soient P le poids du corps, p le poids du même volume d'eau, et p' le poids du même volume d'essence. L'opération effectuée avec de l'essence aura donné la valeur de $\frac{P}{p'}$; or, multiplier cette valeur par la densité de l'essence, c'est la multiplier par $\frac{p'}{p}$, ce qui donne $\frac{P}{p'} \times \frac{p'}{p}$, ou $\frac{P}{p}$, c'est-à-dire la densité du corps par rapport à l'eau.

106. Résultats. — Les Tables ci-après donnent les densités des principaux corps solides et liquides. — On pourra remarquer que, pour certains corps solides, la densité peut varier entre des limites assez étendues. Ainsi, pour les métaux, comme le cuivre ou le platine, l'expérience fournit des valeurs sensiblement différentes, selon qu'on opère sur les échantillons qui ont été simplement fondus, ou sur des échantillons qui ont été soumis ultérieurement à des actions mécaniques, comme le laminage ou l'étirage à la filière. — Le carbone présente aussi des poids spécifiques différents, suivant qu'on le prend à l'état de diamant ou à l'état de graphite. — Des particularités analogues se retrouvent dans le soufre, le phosphore, et dans un grand nombre d'autres corps.

107. Emploi des tables pour déterminer les densités absolues ou les poids spécifiques absolus. — Pour chaque corps, le nombre inscrit dans les Tables permet de déterminer, dans un système quelconque d'unités, le poids spécifique absolu et la densité absolue, pourvu que l'on connaisse le poids spécifique absolu et la densité absolue de l'eau, dans le même système d'unités. — Ainsi, *dans le système d'unités usitées en Mécanique*, le poids du mètre cube d'eau (à Paris) étant de 1000 kilogrammes, et le poids de l'unité de masse (à Paris) étant de $9^k,8$, il en résulte que le poids spécifique absolu de l'eau (à Paris) est 1000, et la densité absolue de l'eau est $\frac{1000}{9,8} = 102$ environ. Dès lors, pour le fer, par exemple, le nombre inscrit dans la Table étant 7,79, le poids spécifique absolu sera $7,79 \times 1000 = 7790$; la densité absolue sera $7,79 \times 102 = 794,58$.

Le système C.G.S. présente, comme il a déjà été dit (98), ce grand avantage que, d'après la définition du gramme-masse, la densité absolue de l'eau est l'unité ; il en résulte que la densité absolue d'un corps est exprimée par le nombre même qui est inscrit dans la Table. Pour le fer, la densité absolue est 7,79, c'est-à-dire que la masse de 1^{cc} est $7^{gr},79$. — Quant au poids spécifique absolu de ce corps, en un lieu déterminé, on l'obtiendra en faisant le produit du nombre inscrit dans la Table par g, l'intensité de la pesanteur en ce lieu. Le poids spécifique absolu du fer, à Paris, est $7,79 \times 981 = 7641,99$, c'est-à-dire que 1^{cc} de fer, à Paris, dans le vide, est sollicité à tomber par une force de $7641^{dynes},99$.

DENSITÉS RELATIVES

CORPS SOLIDES.

Acier trempé	7,82	Ivoire	1,92
Aluminium fondu	2,56	Jayet	1.51
Anthracite	1,40	Laiton	8.45
Antimoine	6,72	Liège	0,24
Argent fondu	10,47	Magnésium	1,74
Arsenic	5, 75	Manganèse	8,01
Bismuth fondu	9,82	Marbre statuaire	2, 71
Bois de hêtre	0,85	Nickel fondu	8.28
— de peuplier	0, 59	Or fondu	19,26
— de sapin jaune	0,66	— forgé	19,3 6
Cadmium écroui	8,69	Phosphore ordinaire	1,8 4
Calcium	1,58	— rouge	2,10
Chrome	5,90	Platine fondu	21. 45
Cobalt fondu	7,81	— écroui	25,00
Cristal de roche	2,65	Plomb	11,35
Cuivre fondu	8,85	Porcelaine de Chine	2,38
— laminé	8,95	— de Sèvres	2,24
Diamant du Brésil	3,52	Potassium	0,87
Étain	7,29	Silicium cristallisé	2,65
Fer	7,79	— amorphe	2,49
Flint-glass	3,39	Sodium	0,97
Fonte de fer	7,21	Soufre natif ou octaédrique	2,07
Glace	0,92	— prismatique	1,97
Graphite	2,16	Succin	1,08
Houille compacte	1,35	Verre à vitres	2,35
Iode	4,95	Zinc	7,19

CORPS LIQUIDES.

Acide nitrique fumant	1,52	Essence de térébenthine	0,86
— sulfurique concentré	1,84	Huile d'olive	0.91
Alcool absolu	0,79	Lait	1,03
Brome	2,97	Mercure	13.59
Eau de mer	1,02	Sulfure de carbone	1.29
— distillée, à 4 degrés	1,00	Vin de Bordeaux	0.99
Esprit de bois	0,80	— de Bourgogne	0, 9

III. — ARÉOMÈTRES A POIDS CONSTANT.

108. Aréomètres à poids constant, en général. — On donne le nom d'*aréomètres à poids constant* à des instruments dont on fait usage dans l'industrie, et qui sont destinés à fournir des indications sur le degré de concentration des liquides, c'est-à-dire sur la quantité d'eau qui s'y trouve mélangée. — Ils se composent tous (*fig.* 84, 85, et 86) d'un tube de verre, portant un renflement à sa partie inférieure; une ampoule, contenant du mercure ou de la grenaille de plomb, sert à lester l'appareil et le maintient vertical quand il flotte dans un liquide. — Ils ne diffèrent entre eux que par leur graduation.

109. Aréomètres de Baumé. — Les aréomètres de Baumé se graduent de deux manières différentes, selon qu'ils sont destinés à des liquides plus denses que l'eau, ou à des liquides moins denses.

1° Les aréomètres destinés à des liquides *plus denses que l'eau* sont désignés, dans l'industrie, sous les noms de *pèse-acides*, *pèse-sirops*, *pèse-sels*, etc. — Pour graduer l'un de ces instruments, on le plonge dans l'eau pure, à la température de 12° environ, et l'on règle le lest de manière qu'il s'enfonce à peu près jusqu'au sommet du tube : on marque zéro au point d'affleurement (*fig.* 84). On fait ensuite une solution contenant, en poids, 15 parties de sel marin pour 85 parties d'eau; on y plonge l'instrument, qui s'y enfonce moins que dans l'eau pure, puisque cette solution est plus dense : au nouveau point d'affleurement, on marque 15. On partage l'intervalle de ces deux points en 15 parties égales, qu'on appelle *degrés* de l'aréomètre, et l'on continue à marquer des degrés égaux jusqu'au bas de la tige.

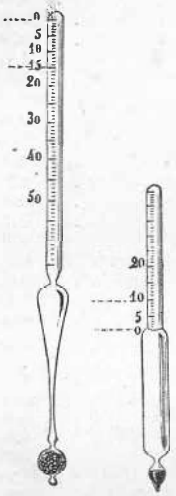


Fig. 84. Fig. 85.
Aréomètres de Baumé.

2° Les aréomètres qui doivent servir pour les liquides *moins denses que l'eau* sont désignés, dans l'industrie, sous le nom de *pèse-esprits*, *pèse-liqueurs*, etc. — Pour graduer l'un de ces instruments, on le plonge d'abord dans une solution contenant 10 parties de sel marin pour 90 parties d'eau, et l'on règle le lest de façon que l'instrument s'enfonce seulement jusqu'à la naissance du tube : on marque zéro au point d'affleurement (*fig.* 85). On plonge ensuite l'instrument dans l'eau pure : au point d'affleurement, on marque 10. On partage l'intervalle de ces deux points en dix parties égales, ou *degrés*, et l'on continue la graduation jusqu'au sommet de la tige (*).

On voit que ces deux graduations sont absolument arbitraires : elles sont, en outre, indépendantes l'une de l'autre, et les deux échelles n'ont pas le même zéro. — Ces instruments sont donc uniquement destinés à fournir des points de repère à l'industrie; on sait, par exemple, que l'acide sulfurique du commerce doit marquer 66° au pèse-acides de Baumé; que l'éther ordinaire du commerce doit marquer au pèse-esprits 56°, et qu'il peut en marquer jusqu'à 65 quand on le rectifie, etc.... Si ces liquides marquent un degré plus élevé que le degré commercial, c'est qu'ils sont plus concentrés qu'on n'est en droit de l'exiger; s'ils marquent un degré moindre, c'est qu'ils ne sont pas assez concentrés. — Mais l'instrument n'indique pas quelle est la proportion d'eau : il ne peut donc donner exactement la valeur vénale du mélange.

(*) Le plus souvent, on se contente de graduer les pèse-liqueurs en les comparant avec d'autres instruments déjà construits : on se dispense alors de marquer sur la tige les dix premiers degrés, qui seraient inutiles dans la pratique.

110. Alcoomètre centésimal de Gay-Lussac. — L'alcoomètre de Gay-Lussac (*fig.* 86) est un aréomètre dont la graduation est effectuée de façon à donner *la richesse en alcool* des mélanges d'alcool et d'eau, pourvu qu'ils ne contiennent aucune autre matière. — La graduation est faite à la température de 15°. On plonge d'abord l'instrument dans de l'alcool absolu, et l'on règle le lest de façon qu'il s'enfonce jusqu'au sommet de la tige : en ce point, on marque 100. Puis on fait une solution contenant *en volume* 95 d'alcool pour 100 ; au point d'affleurement on marque 95, et ainsi de suite, en opérant successivement avec des solutions contenant, en volume, 90, 85, 80, etc., d'alcool pour 100. Les points ainsi déterminés étant très rapprochés, on peut, sans erreur sensible, partager en 5 parties égales l'intervalle compris entre deux points consécutifs. — Si, dans un mélange d'alcool et d'eau, l'instrument s'enfonce jusqu'à la division 78, ce mélange contiendra, en volume, 78 d'alcool pour 100.

Fig. 86. Alcoomètre de Gay-Lussac.

Il est intéressant de remarquer combien sont différentes les grandeurs des divisions ainsi déterminées par l'expérience : les degrés voisins du zéro sont beaucoup plus petits, comme le montre la figure 86, que les degrés voisins du 100e degré.

L'instrument ayant été gradué à la température de 15°, ses indications doivent subir des corrections quand on en fait usage à une autre température. Gay-Lussac a donné des tables qui permettent d'effectuer ces corrections : elles peuvent conduire à modifier, de plusieurs unités, les indications fournies par l'instrument.

111. Pèse-sels centésimaux. — Lorsqu'on a besoin de déterminer la richesse de solutions diverses d'un même sel, on peut graduer un *pèse-sels* centésimal pour cet usage, en se servant *de ce sel lui-même,* comme on s'est servi de l'alcool pour graduer l'alcoomètre. C'est ce qu'on fait dans quelques fabriques, et c'est ainsi encore qu'on a pu construire des *pèse-vins*, des *pèse-laits,* etc. — Mais la confiance qu'on peut avoir dans ces instruments est toujours subordonnée à l'hypothèse que le liquide soumis à l'essai ne contient aucune matière étrangère.

CHAPITRE IV

PESANTEUR DE L'AIR ET DES GAZ. — BAROMÈTRE

---

112. Extension des principes de l'hydrostatique aux corps gazeux. — Les gaz se rapprochent des liquides par la fluidité, c'est-à-dire par la mobilité de leurs molécules, qui rend leur forme variable avec celle du vase qui les contient. Ils s'en distinguent seulement par leur facile compressibilité (26, 27). — Aussi, tous les principes d'hydrostatique qui dépendent seulement de la mobilité des molécules sont-ils applicables aux gaz aussi bien qu'aux liquides.

113. Transmission des pressions dans les gaz. — Égalité de pression en tous sens autour d'un point. — Le principe de la *transmission des pressions*, qui est le principe fondamental de l'hydrostatique (71), est applicable aux corps gazeux.

Si, par exemple, l'intervalle compris entre les deux pistons A et B de la figure 49 était occupé par un gaz, et si, le piston P ayant une surface 100 fois égale à celle du piston p, on venait à placer sur le petit piston un poids de 4 kilogrammes, et sur l'autre un poids de 400 kilogrammes, l'équilibre s'établirait encore. Seulement, dans ce cas, les pistons s'enfonceraient d'abord d'une certaine quantité dans leurs cylindres, en raison de la compressibilité du gaz. — Une fois cette diminution de volume produite, la pression totale transmise au piston P, par l'intermédiaire du gaz, serait équivalente à 100 fois la pression exercée sur le piston p.

En raisonnant comme pour les liquides (71 et 75), on serait conduit à énoncer les deux propositions suivantes :

Quand un gaz, supposé non pesant, est enfermé dans une enveloppe, si l'on exerce, sur une portion plane de la paroi, une pression déterminée, cette pression (rapportée à l'unité de surface) est transmise intégralement à tous les points de la paroi.

A l'intérieur d'un gaz non pesant en équilibre, la pression, ou la force élastique du gaz est la même en tous les points.

114. L'air et les gaz sont pesants. — Pour démontrer que les gaz sont pesants, on peut faire l'expérience suivante, qui n'est qu'une modification d'une expérience de Galilée.

Dans un ballon à robinet, on fait le vide à l'aide de la machine pneumatique. On suspend le ballon sous l'un des plateaux d'une balance (*fig.* 87), et dans l'autre plateau on fait une tare. On ouvre alors le robinet, pour laisser rentrer l'air dans le ballon : on voit le fléau de la balance s'incliner du côté du ballon. Donc *l'air est pesant.* — En laissant rentrer dans le ballon un gaz quelconque, on obtient un résultat semblable. Donc *tous les gaz sont pesants.*

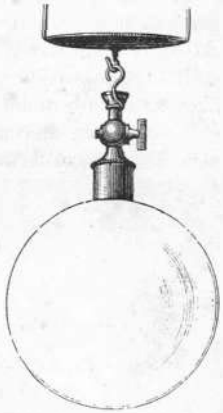


Fig. 87.
Démonstration de la pesanteur de l'air.

Nous verrons plus loin (livre II, chapitre III) comment on peut déterminer avec exactitude le poids (plus exactement la masse) d'un volume déterminé d'un gaz : provisoirement, nous admettrons que le poids d'un litre d'air, sous la pression normale, est environ $1^{gr},3$. — Il en résulte que la masse d'un centimètre cube d'air, pris dans les conditions ordinaires, est $0^{gr},0013$; c'est-à-dire que la densité de l'air est 0,0013.

115. Conditions d'équilibre d'un gaz pesant. — L'air et les gaz étant pesants, tout ce qui a été dit des pressions en différents points d'un liquide en équilibre (74 et 75) leur est applicable. Par suite, *dans une masse* gazeuse en équilibre :

1° *La pression est la même en tous les points d'un même plan horizontal ;*

2° *La différence des forces qui pressent deux éléments de surface égaux, pris dans des plans horizontaux différents, est égale au poids d'un cylindre de gaz, ayant pour base l'un des éléments, et pour hauteur la distance de ces deux plans horizontaux.*

L'atmosphère qui nous entoure nous fournit une masse gazeuse, d'une soixantaine de kilomètres de hauteur, dans laquelle nous pouvons étudier la pression en différents points. — C'est cette étude expérimentale que nous allons maintenant aborder.

116. Pression atmosphérique. — Expérience de Torricelli. — A l'époque où Galilée prouva que l'air est pesant, on expliquait encore par une hypothèse singulière un grand nombre de faits d'observation quotidienne, notamment l'ascension de l'eau dans les tuyaux des pompes aspirantes. On admettait que *la nature a horreur du vide ;* que, partout où un vide tend à se produire, la nature tend à le combler. — Cependant, vers la même époque, des fontainiers de Florence remar-

quèrent que les pompes ne peuvent jamais aspirer l'eau à plus de 32 pieds de hauteur (environ 10 mètres) : l'ancienne hypothèse devenait donc insuffisante.

C'est à Torricelli, élève de Galilée, que revient l'honneur d'avoir prouvé que la cause réelle de ces phénomènes est la pression exercée par l'atmosphère sur la surface libre des liquides. Il pensa que, si cette pression ne peut soutenir qu'une colonne d'eau de 10 mètres de haut, elle ne doit pouvoir soutenir qu'une colonne de mercure de hauteur encore moindre, puisque le mercure est plus dense que l'eau.

Il emplit de mercure un tube de verre AB (*fig.* 88), long d'à peu près 1 mètre, et fermé en A; puis, bouchant l'autre extrémité B avec

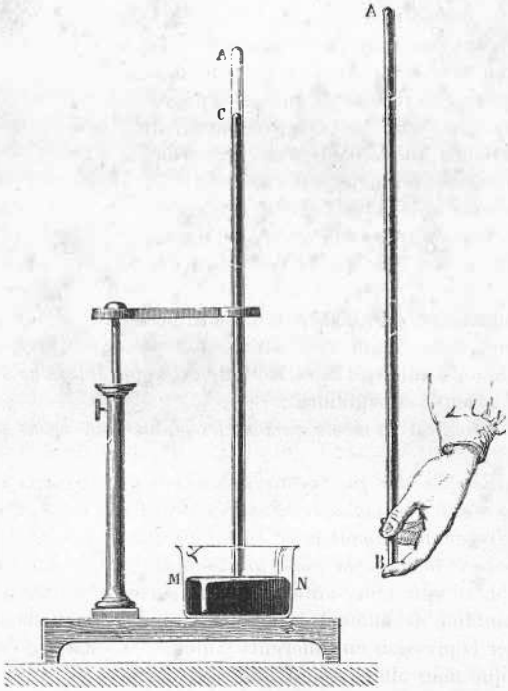


Fig. 88. — Expérience de Torricelli.

le doigt, il renversa le tube et le plongea par cette extrémité dans une cuvette MN contenant du mercure. En retirant le doigt, il vit la colonne liquide conserver, au-dessus de la surface libre MN du mercure dans la cuvette, une hauteur qui, avec nos mesures actuelles, est d'environ 76 centimètres.

117. Expériences de Pascal. — Pascal répéta l'expérience de Torricelli avec d'autres liquides, ayant une densité différente de celle du mercure. Il la répéta, par exemple, avec du vin. — Or, le mercure a pour densité 13,6; la densité du vin est à peu près égale à 1. Pour produire le même effet que le mercure, la colonne de vin devait donc avoir une hauteur treize fois et demie plus grande, ou plus exactement $0^m,76 \times 13,6$, c'est-à-dire à peu près $10^m,55$. Et, en effet, en opérant avec un tube suffisamment long, Pascal constata que le vin resta soutenu jusqu'à une hauteur d'environ 10 mètres, avec nos mesures actuelles.

Enfin, pour achever de rendre la démonstration concluante, Pascal remarqua que la pression atmosphérique doit aller progressivement en diminuant, à mesure qu'on s'élève dans l'atmosphère; par suite, la hauteur du mercure dans l'appareil de Torricelli doit diminuer lorsqu'on le transporte sur une montagne. — Pascal fit installer, par son beau-frère Périer, un appareil de Torricelli sur la montagne du Puy de Dôme, en même temps que d'autres observateurs installaient un appareil semblable dans la plaine. La différence entre les deux colonnes de mercure, observées à un même instant, fut de plus de 8 centimètres (*).

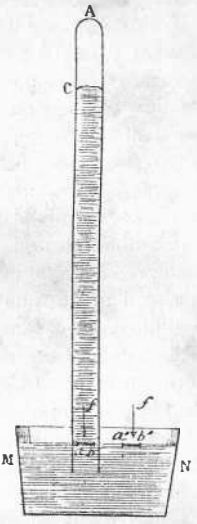


Fig. 89.

118. Interprétation de l'expérience de Torricelli; mesure de la pression atmosphérique. — Revenons à l'expérience de Torricelli, et prenons, au niveau de la surface libre du mercure dans la cuvette MN (*fig.* 89), deux surfaces égales, l'une *ab* à l'intérieur du tube, l'autre *a'b'* à l'extérieur; elles doivent supporter la même pression, puisqu'elles sont situées sur une même surface de niveau, dans la masse de mercure en équilibre. Donc, la force *f* exercée par l'atmosphère sur *a'b'* est égale à celle qu'exerce sur *ab*, de haut en bas, le mercure contenu dans le tube. — Donc, *la pression exercée par l'atmosphère, sur une surface plane quelconque, est égale au poids d'un cylindre de mercure ayant pour base cette surface, et pour hauteur la distance verticale des deux niveaux de mercure dans l'appareil de Torricelli.*

(*) Pascal avait fait lui-même une première expérience à Paris, au sommet de la tour Saint-Jacques; il avait constaté que la hauteur de la colonne de mercure était un peu moindre au sommet de la tour qu'au pied (la différence était d'environ 4 millimètres et demi). Il avait pensé alors qu'on obtiendrait une différence bien plus considérable en opérant sur un lieu beaucoup plus élevé, comme le Puy de Dôme. — C'est en mémoire de ces expériences qu'on a placé la statue de Pascal sous la voûte qui supporte la tour Saint-Jacques.

D'après cela, pour calculer la pression de l'atmosphère sur 1 centimètre carré, il suffit de calculer le poids d'un cylindre de mercure ayant 1^{cmq} de base et 76^{cm} de hauteur. Le volume de ce cylindre est de 76^{cmc}; on obtiendra donc son poids en grammes, en multipliant la densité du mercure 13,6 par 76; on trouve ainsi $1033^{gr},6$, ou $1^{kil},0336$.

Si l'on veut faire usage du système C.G.S., on évaluera en *dynes* la force qui presse sur *un centimètre carré;* c'est le poids d'une masse de $1033^{gr},6$ de mercure. Le poids du gramme à Paris étant de 981 dynes, cette force est égale à $1033,6 \times 981 = 1\,013\,000$ dynes, ou environ une *mégadyne*. La pression atmosphérique est donc d'environ 1 million d'unités de pression C.G.S. (55).

119. Évaluation de la pression atmosphérique, ou de la force élastique de l'air, en hauteur de mercure. — La hauteur de la colonne de mercure dans le tube de Torricelli varie, en un même lieu, aux différents instants du jour : il en est donc de même de la pression atmosphérique. — Au lieu d'estimer cette pression par sa valeur en kilogrammes par mètre carré (unités de la Mécanique), ou en dynes par centimètre carré (unités C.G.S.), on l'exprime ordinairement par la hauteur de la colonne de mercure qui lui fait équilibre. On dit, par exemple, que, à un instant donné, *la pression est de* 75 *centimètres :* cette locution abrégée s'explique d'elle-même (*).

L'évaluation de la pression atmosphérique fournit également celle de la force élastique de l'air. En effet, si l'on isole par la pensée une petite masse d'air au milieu de l'atmosphère, la surface qui la limite étant en équilibre, la pression extérieure, produite par l'atmosphère, est égale à la pression intérieure, due à la force élastique du gaz. On peut donc dire, en employant une locution abrégée semblable à la précédente, que *la force élastique de l'air est de* 75 centimètres.

On conçoit enfin comment la hauteur de la colonne mercurielle est la même, soit qu'on place l'appareil de Torricelli dans un appartement, soit qu'on le place à l'extérieur, puisque la force élastique de l'air de l'appartement est égale à celle de l'air extérieur.

120. Effets produits par la pression atmosphérique. — Crève-vessie, hémisphères de Magdebourg. — On peut rendre manifeste les effets de la pression atmosphérique par les expériences suivantes.

L'expérience du *crève-vessie* (*fig.* 90) consiste à placer, sur la platine de la machine pneumatique, un cylindre de verre, ouvert à ses

(*) Cependant, si les pressions que l'on veut comparer s'exercent en des lieux différents, elles ne sont pas rigoureusement dans le même rapport que les hauteurs des colonnes de mercure qui leur font équilibre. Soient H et H' ces hauteurs; g et g' les intensités de la pesanteur aux deux points considérés; P et P' les pressions sur 1 centimètre carré, et D la densité du mercure. On a :

$$P = HDg, \qquad P' = H'Dg' \qquad \text{et par suite} \quad \frac{P}{P'} = \frac{H}{H'}\frac{g}{g'}.$$

deux extrémités, et sur l'ouverture supérieure duquel on a tendu une membrane de vessie. Tant qu'on ne fait pas fonctionner la machine, la membrane reste plane, quoique chaque centimètre carré soit pressé de haut en bas par une force d'environ 1 kilogramme (118), parce que la force élastique de l'air intérieur exerce sur elle une pression égale, de bas en haut; mais, dès les premiers coups de piston qui diminuent cette force élastique, la membrane s'infléchit, et bientôt elle se brise sous l'effort de la pression atmosphérique.

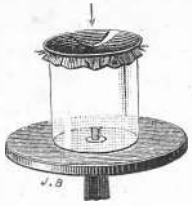


Fig. 90. — Crève-vessie.

Les *hémisphères de Magdebourg* (*fig.* 94) sont deux hémisphères métalliques creux, dont les bords peuvent s'appliquer exactement l'un sur l'autre; une bande de cuir graissé rend la fermeture encore plus hermétique. L'hémisphère inférieur porte un robinet, qui peut se visser sur le conduit de la machine pneumatique. — Les deux hémisphères étant superposés, on fait le vide dans l'intérieur et l'on ferme le robinet. La pression que l'atmosphère exerce extérieurement en chacun des points de la sphère, n'étant plus équilibrée par la force élastique de l'air intérieur, maintient les hémisphères appliqués l'un contre l'autre : deux personnes, tirant en sens opposé, ne peuvent les séparer. Dès qu'on ouvre le robinet, on entend un sifflement qui annonce la rentrée de l'air, et l'on sépare les hémisphères sans difficulté. — Dans une expérience exécutée à Magdebourg par Otto de Guericke, vingt chevaux ne purent parvenir à séparer deux hémisphères d'un diamètre assez considérable, dans lesquels on avait fait le vide.

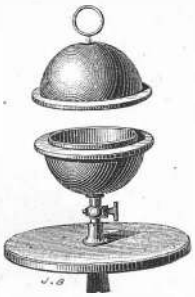


Fig. 91. — Hémisphères de Magdebourg.

121. Effets de la pression atmosphérique sur nos organes. — La pression de l'atmosphère n'a pas, en général, d'effet sensible sur nos organes, bien qu'elle ait une valeur d'environ 105 kilogrammes par décimètre carré. Les cavités de l'organisme sont occupées, ou par des liquides qui sont incompressibles, ou par des gaz dont la force élastique a pris une valeur égale à la pression atmosphérique : cette pression, tant qu'elle reste constante, ne peut donc, ni tendre à diminuer le volume de notre corps, ni en gêner les mouvements.

Nous éprouvons, au contraire, une gêne extrême, quand la pression extérieure vient à diminuer ou à augmenter notablement, parce qu'il n'y a plus équilibre entre elle et la force élastique intérieure. — Ce sont encore des effets de ce genre qui se manifestent, avec exagération, sur les aréonautes qui s'élèvent à des hauteurs considérables, ou sur les

ouvriers qui travaillent sous l'eau, à d'assez grandes profondeurs, dans des appareils à air comprimé.

122. Baromètre à cuvette. — L'appareil de Torricelli, disposé de manière à permettre de mesurer avec précision la pression atmosphérique, prend le nom de *baromètre à cuvette*.

Pour que les indications de l'instrument soient exactes, il faut que la partie supérieure du tube, ou *chambre barométrique*, ne contienne aucun gaz ni aucune vapeur, dont la force élastique puisse déprimer la colonne mercurielle. — Après s'être procuré du mercure bien pur (*), on fait choix d'un tube de 85 à 90 centimètres de longueur (*fig.* 92);

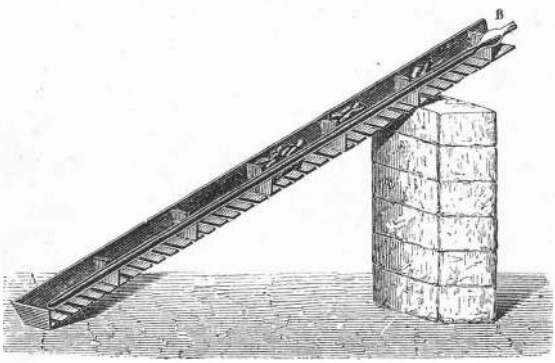


Fig. 92.

on le ferme à l'une de ses extrémités A, et l'on soude une boule B à l'autre extrémité. On emplit ce tube de mercure, et on le couche sur une grille inclinée, où l'on place des charbons ardents, de manière à faire bouillir successivement toutes les parties de la colonne. On chasse ainsi l'humidité et les bulles d'air qui étaient restées adhérentes à la paroi du tube ; la boule B sert à empêcher la projection du mercure pendant l'ébullition. — Lorsque la surface du mercure paraît brillante dans toute la longueur du tube, on laisse refroidir. Enfin, on détache la boule, on bouche avec le doigt l'extrémité ouverte, et l'on installe le tube dans la cuvette. — Une fois l'appareil construit, on reconnaît que le tube a été bien purgé d'air et d'humidité, en l'inclinant jusqu'à ce que le mercure en atteigne le sommet : le liquide doit produire un bruit sec en frappant le sommet du tube.

(*) Le mercure récemment expédié de la mine est, en général, tout à fait pur. Celui qui a déjà servi dans les laboratoires contient souvent un peu d'oxyde et des traces de métaux étrangers ; on le débarrasse de ces impuretés en l'agitant à plusieurs reprises avec de l'acide azotique, lavant ensuite à grande eau, puis séchant avec du papier buvard, et filtrant à travers des entonnoirs de verre effilés.

Mais l'ébullition du mercure dans le tube est une opération délicate : elle a aussi l'inconvénient d'oxyder toujours un peu le mercure. Il est préférable de procéder comme il suit : A l'extrémité B du tube, on soude un petit ballon de verre C (*fig.* 93), présentant, d'une part un tube T

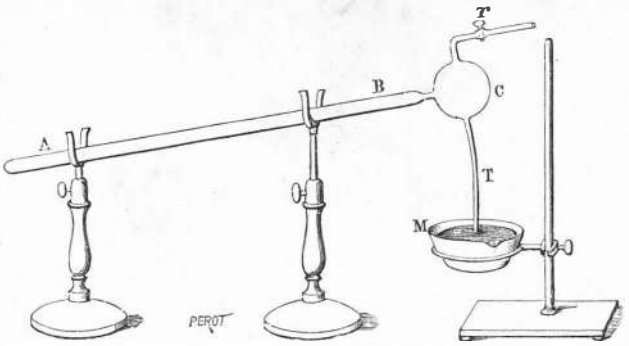


Fig. 93.

terminé par une pointe très effilée et fermée à la lampe, d'autre part un tube muni d'un robinet *r*, par lequel il est mis en communication avec une machine pneumatique à mercure (171). On chauffe le tube AB, en promenant dans toute sa longueur la flamme d'une lampe à alcool, en même temps qu'on y fait un vide aussi parfait que possible. Une fois l'humidité chassée, on introduit l'extrémité du tube T dans un vase M contenant du mercure chauffé au-dessus de 100°, et l'on brise la pointe : le mercure pénètre dans le ballon, puis dans le tube AB. La pointe effilée doit être assez fine pour que le remplissage dure environ deux heures; le tube doit être très peu incliné, de manière que le liquide coule lentement et sans emprisonner de bulle gazeuse. — Lorsque le tube est plein, on ouvre le robinet *r*, on détache la boule C, et l'on termine l'opération comme il a été dit.

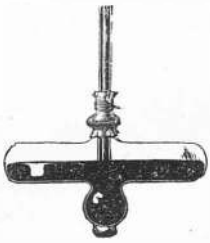


Fig 94.

123. Baromètres usuels à cuvette (*fig.* 94). — Dans les baromètres d'appartement, la cuvette et le tube sont fixés sur une planche de bois : une division en millimètres, dont le zéro est au niveau du liquide dans la cuvette, sert à mesurer la hauteur de la colonne.

Dans ces baromètres, on admet que le niveau du mercure dans la cuvette demeure invariable. Cependant, chaque fois que la colonne monte dans le tube, le niveau s'abaisse dans la cuvette, et réciproquement; ce niveau cesse alors de correspondre au zéro de la gra-

duation. Cet inconvénient peut être atténué en donnant à la cuvette une large surface (*fig.* 94). — La cuvette est fermée par une peau de chamois qui donne passage à l'air, tout en empêchant la poussière de pénétrer.

124. Baromètre de Fortin. — Le baromètre de Fortin est un baromètre à cuvette, qui offre le double avantage d'être à la fois très précis et facilement transportable.

La cuvette est formée par un cylindre de verre, assujetti entre deux montures métalliques (*fig.* 95). La figure 96 montre que ces deux montures NN, MM, sont garnies intérieurement de pièces de buis BB, B'B', pour éviter

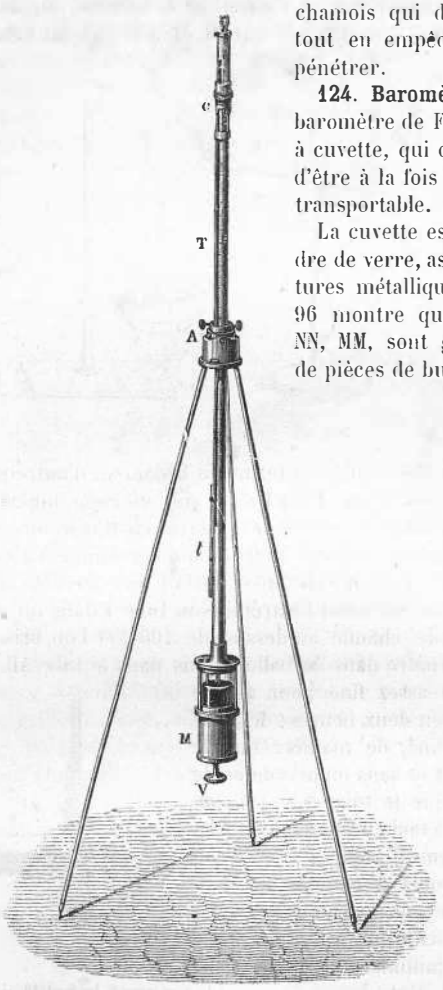


Fig. 95. — Baromètre de Fortin.

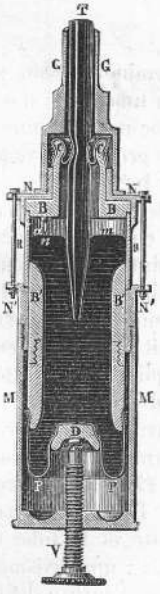


Fig 96.

le contact du mercure avec le métal qu'il pourrait attaquer. — Le fond de la cuvette est formé par une peau de chamois PP; une vis V supporte un disque de buis D, fixé à la peau de chamois, en sorte qu'on peut faire monter ou descendre le niveau du mercure dans la cuvette

en tournant la vis dans un sens ou dans l'autre. Une petite pointe d'ivoire *a*, fixée à la partie supérieure de la cuvette, indique le niveau auquel on devra toujours amener la surface *mn* du mercure, avant de commencer l'observation : ce résultat est atteint lorsque la pointe *a* paraît toucher exactement son image, vue par réflexion dans le mercure.

Le tube du baromètre est fixé dans l'ouverture CC, que présente la cuvette à sa partie supérieure, au moyen d'une peau de chamois qu'il traverse. La flexibilité et la perméabilité de la peau permettent à la pression atmosphérique de s'exercer à la surface du mercure dans la cuvette. — Sur la gaine de laiton qui entoure le tube de verre dans toute sa longueur, sont pratiquées deux fentes, opposées l'une à l'autre ; sur le bord de l'une d'elles est tracée une division en millimètres, dont le zéro correspondrait à l'extrémité de la pointe *a*. — Pour mesurer avec précision la hauteur barométrique, on fait glisser le curseur C (*fig.* 95), jusqu'à ce que le plan horizontal qui limite le curseur paraisse tangent au sommet de la colonne de mercure ; le numéro de la division qui correspond à ce niveau est ainsi déterminé avec exactitude (*).

Pour installer l'instrument, on peut le suspendre par sa partie supérieure, comme un fil à plomb. — On peut encore l'assujettir sur un trépied, comme l'indique la figure 95, en adaptant, vers le milieu A du tube, un système de suspension connu sous le nom de *suspension de Cardan :* ce système de suspension permet au tube de se placer toujours verticalement, sous l'action du poids considérable de mercure que contient la cuvette (**).

En général, quand un baromètre doit être transporté, on a toujours à craindre que des mouvements accidentels ne fassent rentrer de l'air, par la partie inférieure, jusque dans la chambre barométrique, ou que

(*) Pour obtenir plus de précision dans les mesures, on trace, sur le curseur, des divisions faisant *vernier* avec celles de la gaine. On peut ainsi évaluer, à un vingtième de millimètre près, la hauteur de la colonne mercurielle.

(**) La suspension de Cardan présente la disposition suivante : Au cercle métallique A, qui réunit les trois branches du trépied, P, P, P (*fig.* 97), sont fixées deux pointes métalliques *a*, *a'*, placées sur un même diamètre, et dont les extrémités pénètrent dans de petits ombilics pratiqués dans un anneau intérieur B ; dans cet anneau sont fixées deux autres pointes *b*, *b'*, placées sur un diamètre perpendiculaire au premier, et dont les extrémités pénètrent dans les ombilics pratiqués dans la gaine qui entoure le tube T. — Le baromètre étant ainsi mobile autour de la ligne *bb'*, son centre de gravité se placera dans le plan vertical passant par *bb'* ; d'autre part, le système formé par l'instrument et par l'anneau B étant mobile autour de la ligne *aa'*, le centre de gravité se placera également dans le plan vertical passant par *aa' ;* il se placera donc sur l'intersection de ces deux plans verticaux, c'est-à-dire sur la verticale menée par le point d'intersection des droites *aa'* et *bb'*.

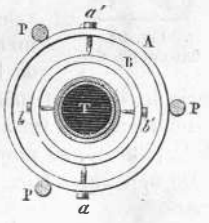


Fig. 97.

les chocs du mercure contre le sommet du tube ne viennent à le briser. — Le baromètre de Fortin est, au contraire, tellement transportable, qu'on peut l'employer comme instrument de voyage. Il suffit de faire monter le fond mobile de la cuvette, à l'aide de la vis V, jusqu'à ce que le mercure remplisse complètement la cuvette et le tube : on peut alors le renverser, ou lui imprimer des mouvements quelconques, sans avoir à craindre ni rentrée d'air, ni rupture du tube.

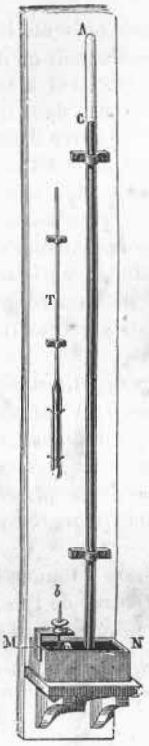


Fig. 98.
Baromètre fixe.

125. Baromètre fixe. — Pour les observations à poste fixe, on emploie la disposition suivante, avec laquelle on obtient toute la précision nécessaire aux recherches scientifiques.

La cuvette MN (*fig.* 98) est en fonte et porte une pièce coudée à angle droit, que traverse une vis verticale *ab* terminée par deux pointes. Le tube a un diamètre d'environ 3 centimètres, et est supporté, ainsi que la cuvette, par une planche fixée au mur. — Pour faire une observation, on fait d'abord mouvoir la vis *ab* jusqu'à ce que sa pointe inférieure *a* vienne toucher la surface du mercure. Il suffit alors de déterminer, au cathétomètre : 1° la distance du sommet du ménisque C à la pointe supérieure *b;* 2° la distance des deux pointes; et d'ajouter ces deux distances.

126. Corrections barométriques. — Les hauteurs barométriques observées doivent subir, pour devenir comparables entre elles, diverses corrections.

Et d'abord l'*action capillaire*, qui s'exerce au sommet de la colonne dont le ménisque est convexe (95), a pour effet de diminuer la hauteur que devrait avoir le mercure. On doit donc ajouter, à la hauteur observée, un terme de correction (*). — Pour obtenir la valeur de ce terme, on tiendra compte, non seulement du diamètre du tube, mais aussi de la hauteur de la *flèche mn* du ménisque (*fig.* 99) qui peut être variable, dans un même tube, pour peu que le mercure ne soit pas absolument pur. On a des tables numériques qui donnent la correction de capillarité, au moyen de ces deux données.

On doit aussi faire subir aux hauteurs observées une *correction de température*, en raison des variations qu'éprouve la densité du mercure

(*) La *correction de capillarité* est négligeable dans les baromètres fixes, dont les tubes ont généralement un diamètre assez considérable. Elle n'est jamais négligeable dans le baromètre de Fortin.

avec la température elle-même. — On verra plus loin (livre II, chapitre IV) comment on effectue cette correction.

Enfin, quand on veut rendre comparables les observations barométriques faites en divers lieux, on doit tenir compte de ce que l'*intensité de la pesanteur*, qui sollicite les colonnes mercurielles, varie d'un lieu à un autre. — C'est là un genre de correction dont le développement excéderait les limites de cet ouvrage.

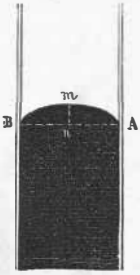


Fig. 99.

127. Baromètre à siphon. — Le baromètre à siphon consiste en un tube recourbé ABD (*fig.* 100), formé de deux branches inégales; la plus grande AB est fermée à la partie supérieure, la plus petite BD est ouverte. On emplit d'abord de mercure la grande branche, en inclinant le tube à diverses reprises; on chasse, par l'ébullition, l'humidité et les bulles d'air restées adhérentes au tube; puis on redresse l'instrument, et on l'amène dans une position verticale. — Le mercure s'abaisse dans la grande branche jusqu'en C, et s'élève dans la petite jusqu'en *m* : la hauteur barométrique est la distance verticale de ces deux points. — Pour mesurer cette distance verticale, on installe entre les deux branches une échelle divisée en millimètres : le zéro est placé vers le milieu de cette échelle; une graduation ascendante donne la distance *h* du zéro au niveau C; une graduation descendante donne la distance *h'* du même zéro au niveau *m*. La somme $h + h'$ est la hauteur barométrique cherchée.

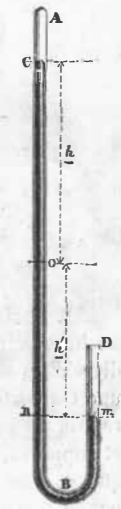


Fig. 100

128. Baromètre de Gay-Lussac — Perfectionnement de Bunten. — On doit à Gay-Lussac un baromètre à siphon, d'un transport facile, et d'un prix moins élevé que celui du baromètre de Fortin. Les deux branches A et E (*fig.* 101) sont réunies par un tube capillaire D; une ouverture très fine, pratiquée en *o*, permet à la pression atmosphérique de se transmettre au niveau *m* du mercure. — L'instrument tout entier est enfermé dans une gaine de laiton : deux fentes longitudinales opposées, dont l'une porte des divisions sur l'un de ses bords, laissent apercevoir les deux ménisques; deux curseurs, semblables à celui du baromètre de Fortin, servent à mesurer les distances *h* et *h'* du zéro aux niveaux du mercure dans les deux branches.

Pour transporter ce baromètre, on l'amène, en le retournant avec précaution, dans la position de la figure 102, de manière que la grande branche arrive à être entièrement pleine de mercure. Lorsqu'on veut faire une observation, on rétablit le tube dans sa première position.

— Dans ces mouvements, la capillarité du tube D empêche l'air de diviser la colonne liquide et de s'introduire dans la chambre barométrique.

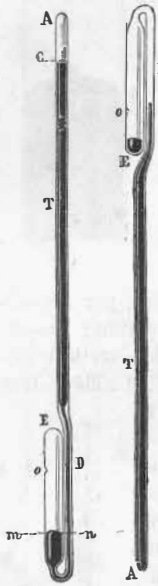


Fig 101.

Fig. 102.

Fig. 103.

Pour plus de sûreté encore, le constructeur Bunten, au lieu de souder directement l'extrémité du tube capillaire D à la petite branche E du baromètre, a imaginé de la terminer en une pointe effilée P (*fig.* 103), et de l'envelopper d'un renflement soufflé dans le tube de verre lui-même. Il est alors impossible qu'une bulle d'air, alors même qu'elle aurait pénétré dans le tube capillaire inférieur, s'introduise par cette pointe et gagne la chambre barométrique; elle va se loger à la partie supérieure du renflement, où sa présence n'a aucun inconvénient.

L'action capillaire s'exerçant en sens contraire aux deux extrémités *m* et C de la colonne mercurielle, Gay-Lussac avait pensé que, si les deux branches avaient le même diamètre, on pourrait négliger l'action de la capillarité. Mais, d'une part, l'égalité rigoureuse des deux diamètres est difficile à réaliser; d'autre part, il n'arrive presque jamais que les deux ménisques aient la même flèche. — On aurait donc tort de croire que l'emploi de ce baromètre comporte une précision plus grande que celui du baromètre de Fortin.

129. Baromètre à cadran. — Le *baromètre à cadran* (*fig.* 104) est un baromètre à siphon dans lequel, au lieu d'observer sur une échelle divisée les mouvements de la colonne de mercure, on les amplifie par une disposition particulière. — Sur le mercure de la petite branche, repose un poids *p*, suspendu par un fil qui passe en M sur une poulie et supporte, à son autre extrémité, un contrepoids *p'* un peu moindre que *p*. Une aiguille mobile sur un cadran est fixée sur l'axe de la poulie : si le mercure baisse en *m*, l'aiguille tourne dans un sens, entraînée par le poids *p*, qui suit le mercure : elle marche en sens contraire, quand le niveau en *m* remonte. On marque, sur le cadran, en face des positions diverses de l'aiguille, les hauteurs correspondantes de la colonne barométrique. — Cet instrument, longtemps employé comme baromètre d'appartement, l'est beaucoup moins aujourd'hui; il est peu sensible, en raison des frottements qui se produisent entre l'axe de la poulie et ses supports.

130. Baromètres métalliques. — On construit enfin des baromètres dont le jeu est fondé sur l'élasticité des métaux. — La figure 105 représente l'un des plus répandus.

La partie principale de l'instrument est une boîte ronde, dont l'une des faces est formée par une lame métallique mince, qui présente des plis circulaires destinés à augmenter sa flexibilité (on distingue, sur la figure, à peu près la moitié de cette boîte). On a fait le vide dans la boîte, et on l'a fermée ensuite hermétiquement. La pression atmosphérique fait fléchir la lame, comme la membrane dans l'expérience du *crève-vessie* (120), mais ici la lame est assez résistante pour ne pas se briser. — Quand la pression atmosphérique augmente, la lame s'infléchit davantage; elle tend à se redresser quand la pression atmosphérique diminue. Ces mouvements sont transmis à un système d'engrenages, de manière à imprimer des déplacements beaucoup plus grands à une aiguille mobile sur un cadran. Le constructeur, en comparant les indications de l'instrument avec celles d'un baromètre à mercure, inscrit sur le cadran les hauteurs de la colonne de mercure qui correspondent aux diverses positions de l'aiguille.

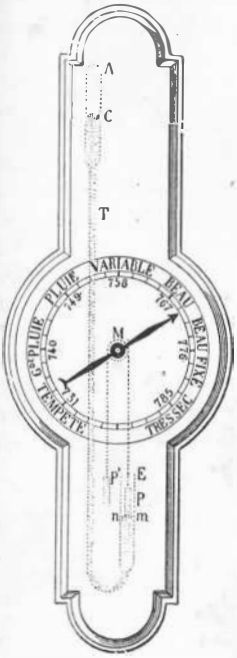


Fig. 104.
Baromètre à cadran.

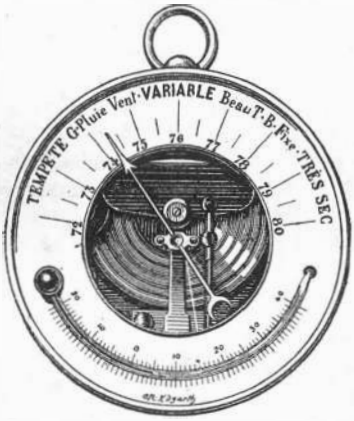


Fig. 105. — Baromètre métallique.

Les baromètres métalliques sont peu volumineux et facilement transportables. Cet avantage, joint à leur prix peu élevé, les fait préférer aux baromètres à mercure, dans un grand nombre de cas. Ils accusent, par des mouvements appréciables de l'aiguille, de petites variations de la pression atmosphérique; mais l'état moléculaire du

métal éprouve des modifications lentes, qui nécessitent, de temps à autre, une nouvelle comparaison de chaque instrument avec le baromètre à mercure, et un nouveau réglage.

131. Mesure des hauteurs par le baromètre. — La hauteur barométrique diminuant à mesure qu'on s'élève dans l'atmosphère, il serait intéressant d'obtenir une relation précise entre les variations de la colonne et les différences d'altitude correspondantes Une pareille relation permettrait, par exemple, de déterminer la hauteur d'une montagne, au moyen de deux observations faites *simultanément*, l'une au sommet, l'autre au pied de la montagne.

Mais la diminution de la colonne barométrique est due, d'une part, à ce que la hauteur de la couche d'air située au-dessus du point considéré devient moindre; d'autre part, à ce que la densité de l'air va progressivement en décroissant jusqu'aux limites de l'atmosphère. Or, pour calculer avec exactitude les variations de densité de l'air, il ne suffit pas de tenir compte des variations de pression, il faudrait aussi faire intervenir, dans le calcul, un abaissement progressif de la température, que l'observation constate, mais dont la loi rigoureuse est encore inconnue. — On n'a donc pu établir une formule mathématique qu'en ayant recours à certaines hypothèses, et l'on a dû calculer ensuite, à l'aide de déterminations directes, effectuées dans les régions de l'atmosphère qui nous sont accessibles, les valeurs des coefficients que cette formule contient.

La formule la plus précise est celle qui est due à Laplace :

$$X = 18393^{m}\,(1 + 0{,}002837\cos 2\lambda)\left[1 \times \frac{2\,(T + t)}{1000}\right]\log\frac{H}{h};$$

X représente la hauteur cherchée, λ la latitude du lieu, T et H la température et la pression au pied de la montagne, t et h la température et la pression au sommet.

Quand la hauteur X ne dépasse pas 1000 ou 1200 mètres, on peut employer la formule plus simple donnée par Babinet,

$$X = 16000^{m}\left[1 + \frac{2\,(T + t)}{1000}\right]\frac{H - h}{H + h}.$$

(Voir à la fin du volume (livre VI, *Météorologie*) ce qui concerne les variations barométriques en un même lieu ou aux divers points du Globe).

CHAPITRE V

FORCE ÉLASTIQUE DES GAZ

I. — LOI DE MARIOTTE.

132. — La force élastique d'un gaz augmente à mesure que son volume diminue : c'est ce que montre l'expérience du *briquet à air* (27). Mais cet appareil ne permet d'évaluer ni les volumes successifs du gaz, ni les pressions qu'il supporte. On a dû recourir à d'autres expériences pour obtenir une relation précise entre ces quantités.

Remarquons d'abord que, lorsqu'une masse gazeuse est en équilibre, la force élastique de ce gaz est égale à la pression qu'il supporte : les deux expressions *force élastique du gaz* et *pression supportée par le gaz* peuvent donc être prises l'une pour l'autre.

133. Loi de Mariotte. — *A une même température, les volumes d'une même masse gazeuse sont inversement proportionnels aux pressions qu'elle supporte*(*).

Nous allons vérifier cette loi, au moins approximativement, pour l'air en particulier, au moyen de deux séries d'expériences.

1° Le *tube de Mariotte* est un tube de verre (*fig.* 106) formé de deux branches inégales; la plus grande B est ouverte, la plus petite A est fermée à sa partie supérieure. — On verse du mercure dans le tube, de manière à enfermer dans la branche A une certaine quantité d'air, et on commence par faire en sorte que les surfaces du mercure M et M′ dans les deux branches soient dans un même plan horizontal, comme le représente la figure 107 (c'est ce à quoi on parvient facilement, en inclinant le tube de manière à laisser sortir un peu de l'air que contenait la petite branche). Lorsque ce résultat est obtenu, le volume de l'air AM peut se mesurer au moyen de divisions marquées sur la planche qui soutient le tube : supposons que ce volume corresponde, par exemple, à 20 divisions. Quant à la force élastique de l'air, elle est égale à la pression atmosphérique, qui s'exerce en M dans le même plan horizontal. — On ajoute alors du mercure dans la branche B, de

(*) Cette loi a été énoncée simultanément, vers 1670, en France par l'abbé Mariotte et en Angleterre par Boyle.

açon que le liquide, en s'élevant en A, comprime l'air et réduise son volume à *moitié* (*fig.* 108), c'est-à-dire à 10 divisions. Si la loi de Mariotte est exacte, la force élastique de cet air doit alors être égale au *double* de la pression atmosphérique ; or, cette force élastique, qui

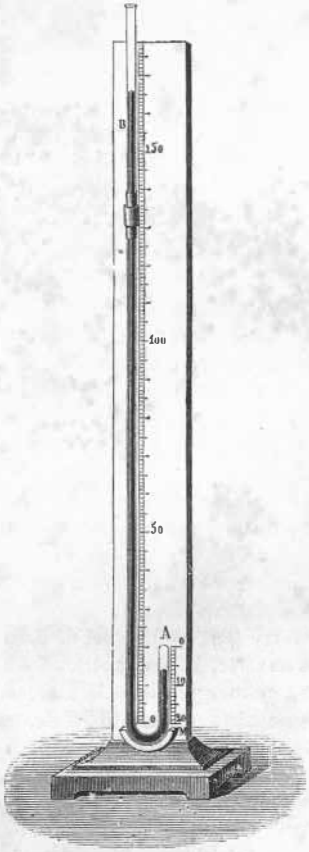


Fig. 103. — Tube de Mariotte.

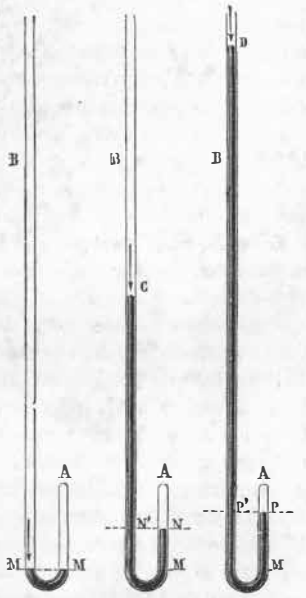


Fig. 107. Fig. 108. Fig. 109.

s'exerce en N, fait équilibre à la pression qui s'exerce en N′ sur le même plan horizontal, c'est-à-dire à la pression de la colonne de mercure N′C, plus la pression atmosphérique exercée en C ; donc la colonne N′C doit avoir une hauteur égale à la hauteur barométrique, c'est-à-dire à environ 76 centimètres ; c'est ce que l'observation vérifie. — Si le tube B a une longueur suffisante, on pourra réduire le volume de

l'air *au tiers* AP du volume initial (*fig.* 109), et constater que sa force élastique devient alors *triple* de la pression atmosphérique, c'est-à-dire que la hauteur P'D du mercure au-dessus du niveau P est égale à deux fois la hauteur barométrique; et ainsi de suite.

2° Une autre disposition, due également à Mariotte, permet encore de vérifier la loi, en enfermant de l'air sous la pression atmosphérique et augmentant son volume. — On prend un tube de verre cylindrique B (*fig.* 110), semblable à un tube de baromètre, et, au lieu de l'emplir complètement de mercure, on y laisse un certain espace plein d'air; on bouche avec le doigt l'extrémité ouverte, et on la plonge dans une *cuvette profonde* à mercure M. — On enfonce d'abord le tube (*fig.* 111), de manière que les surfaces de mercure dans ce tube et dans la cuvette soient dans un même plan horizontal. On mesure le volume de l'air, en mesurant la longueur AM qu'il occupe dans le tube; quant à sa force élastique, elle est égale à la pression atmosphérique. — On soulève ensuite le tube, jusqu'à ce que le volume occupé par l'air devienne *double* de ce qu'il était; en même temps, on voit le mercure s'élever dans le tube (*fig.* 112). Or, si la loi de Mariotte est exacte, la force élastique de cet air doit alors être égale à *la moitié* de la pression atmosphérique; mais cette force élastique, ajoutée à la pression de la colonne de mercure soulevée MN, doit exercer, au niveau M du mercure extérieur, une pression égale à la pression atmosphérique; donc la colonne soulevée MN doit être égale à la moitié de

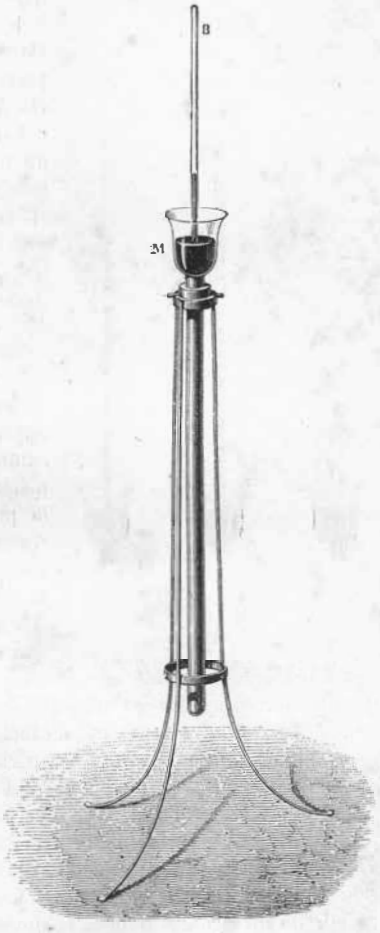


Fig. 110.

76 centimètres environ, ou à 38 centimètres. C'est ce qu'on vérifie en mesurant cette colonne. — On soulève encore le tube, jusqu'à ce que le volume AP de l'air devienne *triple* du volume initial (*fig.* 113). Si la loi de Mariotte est exacte, sa force élastique doit être alors *le tiers* de la pression atmosphérique : cette force élastique, ajoutée à la pression de la colonne soulevée MP, doit produire, au niveau du mercure extérieur M, une pression égale à la pression atmosphérique : la colonne soulevée MP doit donc avoir une hauteur égale aux deux tiers de 76 centimètres, c'est-à-dire 51^{c} environ. C'est ce qu'on vérifie encore en mesurant cette colonne; et ainsi de suite.

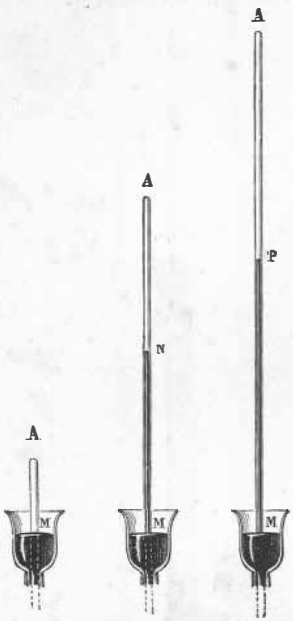


Fig. 111. Fig. 112. Fig. 113.

134. La loi de Mariotte ne doit être considérée que comme une loi approximative. — Les expériences comme celles qui précèdent ne permettent de faire varier le volume et la pression qu'entre des limites très restreintes. En outre, les mesures ne comportent pas une précision suffisante pour que les résultats puissent être considérés comme une vérification *rigoureuse* de la loi de Mariotte.

En 1823, des expériences de Faraday, effectuées spécialement en vue de liquéfier les gaz sous l'influence de pressions considérables, amenèrent à concevoir des doutes sur l'exactitude absolue de la loi de Mariotte. — Quelques années après, les expériences d'Œrsted à Copenhague, et celles de Despretz et de Pouillet à Paris, montrèrent que des gaz de natures diverses, placés dans des tubes disposés à côté les uns des autres, et soumis aux mêmes variations de pression, éprouvent des variations de volume sensiblement différentes. — La loi de Mariotte ne pouvait donc pas être exacte pour tous les gaz; il était même possible qu'elle ne fût rigoureusement applicable à aucun d'eux.

Dès lors il devenait nécessaire de reprendre la question par des expériences permettant des mesures précises.

135. Principe de la méthode de Dulong et Arago. — Les expériences de Dulong et Arago portèrent exclusivement sur la loi de compressibilité *de l'air*. — Leur appareil, dont la figure 114 peut donner une idée, n'était autre qu'un tube de Mariotte, d'une très

grande hauteur, afin de pouvoir opérer sur de très grandes pressions.

La grande branche NS était formée par une suite de treize tubes de cristal, de 2 mètres chacun, qui étaient appliqués sur des poutres dressées dans la vieille tour carrée du lycée Henri IV; la petite branche AT était formée par un seul tube, fermé à son extrémité supérieure, et environné d'un manchon parcouru incessamment par un courant d'eau froide, pour maintenir constante la température de l'air qu'il contenait, malgré la chaleur dégagée par la compression. Ces deux branches verticales étaient mastiquées dans un conduit horizontal de fonte MN. Au lieu d'introduire le mercure par la partie supérieure de la grande branche, ce qui aurait produit des ébranlements capables de compromettre la solidité de l'appareil, on avait disposé, entre les deux branches, un réservoir R contenant une quantité de mercure assez considérable : lorsqu'on voulait faire varier la pression, on refoulait progressivement le mercure en comprimant, à sa surface *ab*, de l'eau que la petite pompe P puisait, par le tube *t*, dans un réservoir voisin.

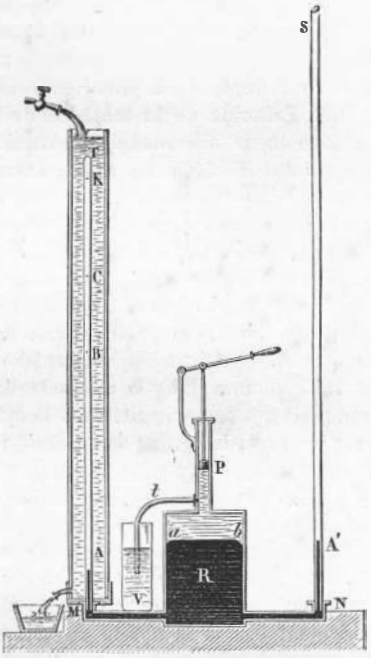


Fig. 114. — Appareil de Dulong et Arago.

Il est aisé de voir que le défaut principal de cette méthode était de présenter, dans la mesure des volumes successifs de l'air, une *sensibilité décroissante*. — En effet, soit TA le volume occupé par l'air sous la pression atmosphérique; supposons, pour plus de simplicité, que le tube soit rigoureusement cylindrique, et qu'il ait une longueur de 2 mètres au-dessus du point A. La loi de Mariotte étant au moins une loi approchée, lorsque la pression acquiert des valeurs successives de 2, 3, 5, 10, 20 atmosphères, le gaz doit occuper des longueurs de tube représentées approximativement par $\frac{1}{2}$, $\frac{1}{3}$, $\frac{1}{5}$, $\frac{1}{10}$, $\frac{1}{20}$ de AT. Or, dans l'évaluation de la première longueur BT, égale à environ 1 mètre, une erreur de lecture d'un millimètre représente seulement un millième du volume du gaz; la même erreur absolue d'un millimètre, commise sur la dernière longueur TK, c'est-

à-dire sur un décimètre, représentera la centième partie du volume actuel du gaz; elle aura donc une valeur relative 10 fois plus grande que la précédente, et il est à craindre que, pour les pressions considérables, ces erreurs n'atteignent une valeur supérieure aux différences qu'on devrait constater.

Aussi, bien que l'appareil eût été construit avec un soin extrême, bien que l'habileté des expérimentateurs pût même suppléer, jusqu'à un certain point, aux défauts du procédé, on trouva, pour l'air, des différences si petites entre les résultats obtenus et la théorie, qu'on les mit sur le compte des erreurs d'expériences, et l'on admit, pour ce gaz, l'exactitude à peu près rigoureuse de la loi de Mariotte.

136. Principe de la méthode de Regnault. — Regnault apporta à cette méthode une modification qui en fit une méthode nouvelle, en permettant d'évaluer les volumes successifs du gaz avec une approximation relative constante.

Dans l'appareil qui fut construit au Collège de France (*fig.* 115), la partie supérieure de la petite branche fut munie d'un robinet *r*, capable de garder les gaz sous des pressions de plusieurs atmosphères, et communiquant, par un tube métallique *o'* avec un réservoir où l'on avait comprimé une assez grande masse du gaz sur lequel on devait opérer. Pour introduire le mercure dans les deux branches de l'appareil, on se servait, comme dans la méthode de Dulong et Arago, d'une petite pompe P, qui comprimait, dans le cylindre C, l'eau qu'elle puisait dans le vase V; mais cette pompe était placée sur le côté de l'appareil: aussitôt qu'on l'avait fait fonctionner, on fermait le gros robinet R, afin d'intercepter la communication et de maintenir les niveaux bien constants dans les deux tubes pendant l'observation.

Voici maintenant en quoi consiste surtout la supériorité de la méthode. Deux traits *a* et *b* étaient marqués sur la petite branche; le volume intérieur compris entre eux avait été exactement mesuré; il était sensiblement égal à la moitié du volume compris entre le trait *a* et le robinet *r*. Pour faire une expérience, on introduisait d'abord du gaz par le robinet *r* jusqu'à ce que le niveau du mercure descendit au point *a*, et on mesurait la pression de ce gaz, au moyen de la différence de hauteur du mercure dans les deux branches, et de la hauteur barométrique au moment de l'observation. On ouvrait alors le robinet inférieur R, et on faisait fonctionner la pompe à eau P, de manière à refouler le mercure dans la petite branche jusqu'en *b*, c'est-à-dire à réduire le volume à moitié; on fermait R, et on déterminait la nouvelle pression. S'il y avait une différence entre la pression ainsi mesurée et celle qu'aurait donnée la loi de Mariotte, on en connaissait le sens et la grandeur. — Pour opérer sous une pression plus grande, on ouvrait le robinet *r*, et on laissait entrer dans le tube *une nouvelle quantité de gaz*, de façon que le niveau du mercure revint en *a* : après avoir

déterminé la pression, on ouvrait R et l'on comprimait encore ce gaz jusqu'à ce que le niveau revint en *b;* on mesurait la nouvelle pression acquise par cette masse de gaz, et on la comparait encore avec celle qu'aurait fournie la loi de Mariotte. — On continua ainsi jusqu'aux pressions les plus considérables que permit d'atteindre la longueur de la grande branche. — On voit que, dans chacune des expériences, la masse gazeuse introduite dans le tube éprouvait toujours une même réduction de volume, et la mesure des pressions permettait de soumettre la loi de Mariotte à une série de vérifications dont la précision restait constante (*).

Les expériences effectuées avec cet appareil conduisirent Regnault à cette conclusion que, jusqu'à 30 atmosphères, l'air, l'azote et l'acide carbonique s'écartent de la loi de Mariotte dans le même sens : sous des pressions croissantes, leur volume éprouve des *diminutions plus grandes* que cette loi ne l'indique (**). L'écart est surtout considérable pour l'acide carbonique, c'est-à-dire pour celui de ces trois gaz qui est le plus facilement liquéfiable : ainsi, en combinant entre eux les résultats obtenus dans des expériences effectuées sous des pressions croissantes, on trouve que, pour réduire une même masse d'acide carbonique à $\frac{4}{10}$ du volume qu'elle occupait sous la pression atmosphérique, il suffit d'une pression d'environ 15 atmosphères. — Au contraire, l'hydrogène s'écarte de la loi de Mariotte dans un sens opposé; pour des pressions

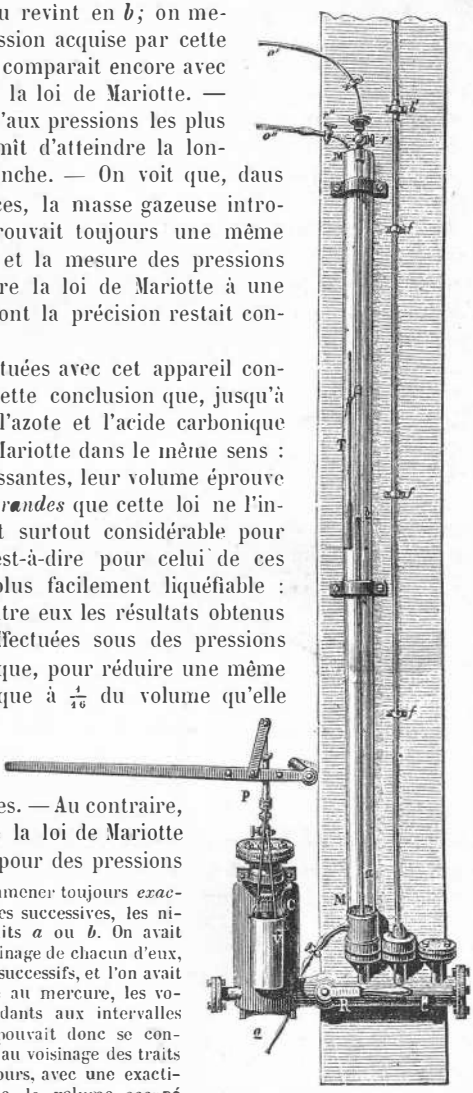


Fig. 115. — Appareil de Regnault

(*) Il eût été difficile de ramener toujours *exactement*, dans les expériences successives, les niveaux du mercure aux traits *a* ou *b*. On avait marqué sur le tube, au voisinage de chacun d'eux, un certain nombre de traits successifs, et l'on avait déterminé, par un jaugeage au mercure, les volumes intérieurs correspondants aux intervalles des traits consécutifs. On pouvait donc se contenter d'amener le mercure au voisinage des traits *a* ou *b*; on connaissait toujours, avec une exactitude sensiblement constante, le volume occupé par le gaz à chaque nouvelle détermination.

(**) On n'opéra pas sur l'oxygène pur, parce que ce gaz est absorbé par le mercure dès que la pression devient un peu considérable.

croissantes, son volume éprouve des diminutions *un peu moindres* que ne l'indique la loi.

Dans des recherches ultérieures, Regnault a pu employer un appareil de dimensions beaucoup moindres que le précédent, pour étudier la compressibilité de certains gaz beaucoup plus voisins de leur point de liquéfaction, comme l'acide sulfhydrique, l'ammoniaque, l'acide sulfureux, etc. Il a constaté qu'il suffit de faire varier la pression entre 1 et 2 atmosphères, pour que ces gaz présentent des écarts sensibles par rapport à la loi de Mariotte.

137. Compressibilité des gaz sous de fortes pressions. — A la température ordinaire, la plupart des gaz se liquéfient lorsque la pression devient suffisamment grande. Seuls, quelques gaz tels que l'hydrogène, l'azote, l'air, ne se liquéfient pas à la température ordinaire, quelle que soit la pression qu'on leur fasse supporter. La loi de compressibilité de ces gaz a été étudiée par Natterer en 1850, puis par M. Cailletet en 1870, sous des pressions dépassant de beaucoup les limites que Regnault avait pu atteindre. — Voici les résultats généraux de ces expériences.

Quand une masse de gaz occupe un volume v_0 sous une pression p_0 peu différente de la pression atmosphérique, si on le soumet à une pression p égale à plusieurs atmosphères, la loi de Mariotte lui assigne un volume v défini par la relation :

$$\frac{v}{v_0} = \frac{p_0}{p}, \qquad \text{ou} \qquad v = \frac{v_0 p_0}{p}.$$

Or, un gaz liquéfiable à la température ordinaire (acide carbonique, acide sulfureux), soumis à une pression progressivement croissante, prend toujours un volume v plus petit que le volume assigné par la loi de Mariotte; c'est-à-dire que l'expression $\frac{vp}{v_0 p_0}$ est plus petite que l'unité; on constate qu'elle diminue toujours à mesure que la pression se rapproche de celle qui produirait la liquéfaction. C'est ce qu'on exprime en disant que les gaz liquéfiables à la température ordinaire sont *de plus en plus compressibles.* — Pour une pression déterminée p, l'écart $1 - \frac{vp}{v_0 p_0}$ est d'autant plus grand que le gaz sur lequel on opère est plus facilement liquéfiable.

Au contraire, l'hydrogène, soumis à des pressions p de plus en plus grandes, prend un volume v toujours plus grand que le volume théorique $\frac{v_0 p_0}{p}$; c'est-à-dire que l'expression $\frac{vp}{v_0 p_0}$ est plus grande que l'unité; on constate même qu'elle croît à mesure que p augmente. On peut dire que l'hydrogène *résiste à la compression*, et y résiste de plus en plus.

Enfin, pour les autres gaz non liquéfiables à la température ordinaire, en particulier pour l'azote, tant que p croît depuis 1 atmosphère jusqu'à 75 atmosphères, le volume réel est plus petit que le volume théorique : l'expression $\frac{vp}{v_0 p_0}$, plus petite que l'unité, va en diminuant ; à partir de 75 atmosphères elle augmente, repasse par l'unité pour une pression de 125 atmosphères (c'est-à-dire que, sous cette pression, le gaz prend un volume conforme à la loi de Mariotte) ; elle acquiert ensuite des valeurs supérieures à l'unité et assez rapidement croissantes. — On peut donc dire que, jusqu'à 75 atmosphères, l'azote se comporte comme un gaz liquéfiable, il est *de plus en plus compressible ;* mais à partir de 75 atmosphères, il *résiste à la compression :* on constate même que, pour des pressions de 1500 atmosphères, il résiste plus que l'hydrogène.

138. Autre énoncé de la loi de Mariotte. — Si l'on fait abstraction des conditions exceptionnelles que nous venons d'indiquer, on peut dire que la loi reste, en général, *suffisamment approchée* pour permettre de calculer les variations de volume que doit éprouver un gaz sous des variations de pression pen considérables, et dans des conditions où il reste suffisamment éloigné de son point de liquéfaction.

Si V est le volume d'une masse de gaz sous la pression P, et V′ le volume correspondant à une autre pression P′, la loi de Mariotte s'exprime par la formule

$$\frac{V}{V'} = \frac{P'}{P} \qquad \text{ou} \qquad VP = V'P'.$$

Or, si P″ est une troisième pression et V″ le volume correspondant, on aura encore VP = V″P″, et ainsi de suite ; on peut donc écrire :

$$VP = V'P' = V''P'' = \ldots$$

c'est-à-dire que, *à une même température, le produit du volume d'une masse gazeuse par la pression correspondante est constant.*

139. Évaluation du volume d'une masse gazeuse sous la pression normale. — Lorsque, pour comparer entre elles diverses quantités de gaz, on mesure les volumes qu'elles occupent, les résultats ne sont immédiatement comparables qu'autant que ces mesures ont été effectuées *sous une même pression.* — Or dans la plupart des cas, on ne peut pas disposer à volonté des pressions ; mais, si les pressions des divers gaz sont connues, on peut calculer, en appliquant la loi de Mariotte, le volume que chacun d'eux occuperait sous la pression de 76 centimètres, qu'on désigne sous le nom de *pression normale.*

Soit, par exemple, un gaz contenu dans une éprouvette graduée en parties d'égales capacités, et placée sur le mercure ; supposons

d'abord que le niveau du mercure dans l'éprouvette soit le même qu'à l'extérieur. La graduation donnera le volume V du gaz, sous la pression de l'atmosphère H, fournie par l'observation du baromètre au même instant. Dès lors le volume V' que le gaz occuperait sous la pression normale sera donné par la formule

$$V' = V\frac{H}{76}.$$

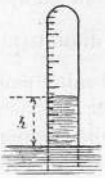


Fig. 116.

Supposons maintenant que le niveau dans l'éprouvette soit au-dessus du niveau extérieur (*fig.* 116); la force élastique du gaz est mesurée par la hauteur barométrique H, diminuée de la différence h des niveaux. Connaissant donc, au moyen de la graduation de l'éprouvette, le volume V du gaz sous la pression $H - h$, on en déduira le volume V' sous la pression normale, au moyen de la formule

$$V' = V\frac{H-h}{76}.$$

Ces exemples suffisent pour faire concevoir la manière d'opérer, dans les divers cas qui pourront se présenter.

II. — MESURE DE LA FORCE ÉLASTIQUE DES GAZ. — MANOMÈTRES.

140. Manomètres en général. — On donne le nom général de *manomètres* à des instruments destinés à mesurer les forces élastiques des gaz ou des vapeurs.

L'une des applications les plus importantes est la mesure des pressions dans les chaudières à vapeur. — Ces pressions étant généralement considérables, on a été conduit d'abord à les évaluer en *atmosphères;* cette unité de pression correspond à une force de $1^{kg},033$ par centimètre carré : c'est la valeur moyenne de la pression atmosphérique représentée par une colonne de mercure de 76 centimètres de hauteur. — L'usage a prévalu aujourd'hui de graduer les manomètres industriels en prenant, comme unité de pression, *la pression de 1 kilogramme par centimètre carré* (c'est la pression qu'exercerait une colonne de mercure dont la hauteur serait $\frac{76}{1,033}$, ou $73^{cm},5$).

Lorsqu'un manomètre, adapté à une chaudière à vapeur, marque 10 kilogrammes, cela signifie que chaque centimètre carré de la paroi supporte une pression de 10 kilogrammes, de dedans en dehors; si l'on remarque que la paroi supporte extérieurement la pression de l'atmo-

sphère, équivalente à 1 kilogramme environ, on voit que la force résultante, celle qui tendrait à produire la rupture, est alors de 9 kilogrammes par centimètre carré. — La résistance de chaque chaudière ayant été évaluée par des essais préliminaires, l'observation du manomètre permet de faire en sorte que la pression reste toujours inférieure à celle qui a été atteinte dans ces essais.

141. Manomètre à air libre. — Le manomètre à air libre le plus simple consiste en un tube de verre MN (*fig.* 117), ouvert à ses deux extrémités, et plongeant dans une cuvette à mercure A placée dans une boîte métallique B; le tube est mastiqué solidement en C: la vapeur, arrivant dans la boîte par le robinet R, fait monter le mercure dans le tube. Cet appareil n'étant pas destiné à des évaluations précises, on suppose que le niveau du mercure reste invariable dans la cuvette. — Si le niveau dans le tube est sur le même plan horizontal que dans la cuvette, la pression dans la chaudière est égale à la pression atmosphérique, ou approximativement 1 kilogramme par centimètre carré ; lorsque la pression dans la chaudière devient 2 kilogrammes, le mercure monte de 73^{cm},5 dans le tube ; si la pression devient 3 kilogrammes, la hauteur du mercure devient égale à 73^{cm},5 $\times$ 2 ; et ainsi de suite. On peut donc marquer 2, 3... kilogrammes, sur la planche qui supporte le tube, à des distances du niveau du mercure dans la cuvette égales aux multiples successifs de 73^{cm},5. En subdivisant ensuite chacun de ces intervalles, on peut évaluer les fractions de kilogramme.

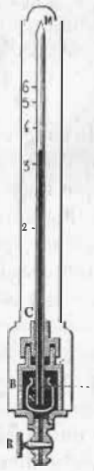


Fig. 118. Manomètre à air comprimé.

142. Manomètre à air comprimé. — Le manomètre à air comprimé (*fig.* 118) diffère du précédent en ce que le tube de verre est plus court, et fermé à sa partie supérieure M. Dans ce tube est enfermée une quantité d'air telle, que, sous la pression atmosphérique égale à 1 kilogramme environ, les niveaux du mercure dans le tube et dans la cuvette soient sur un même plan horizontal. Lorsque, sous l'action d'une pression plus grande dans la boîte, le mercure monte dans le tube, l'air se comprime : pour évaluer la pression qui s'exerce en A, il faut ajouter, à la pression de la colonne de mercure, la force élastique de cet air, qui varie en raison

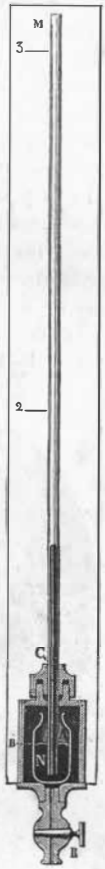


Fig. 117. Manomètre à air libre.

inverse de son volume. On voit donc que la pression de 2 kilogrammes doit être indiquée à une distance du sommet M un peu plus grande que la moitié de MA; celle de 3 kilogrammes, à une distance un peu plus grande que le tiers de MA, et ainsi de suite. Les constructeurs déterminent généralement la position des points de division, en comparant les indications de l'instrument à celles d'un manomètre à air libre (*).

Le principal avantage de cet instrument est de n'avoir qu'une petite hauteur, et d'être, par suite, d'une installation plus commode que le manomètre à air libre. Mais les chiffres qui marquent les pressions un peu grandes, 8, 9, 10..., arrivent à être tellement voisins les uns des autres, qu'une petite erreur dans l'observation du niveau du mercure peut correspondre à une erreur considérable dans l'évaluation de la pression. — En outre, l'oxydation du mercure, qui se produit au contact de l'air comprimé, a pour effet de salir le tube et de rendre les indications peu précises.

143. Manomètres métalliques. — Aux manomètres à mercure on substitue, pour la plupart des machines à haute pression, des manomètres dont le jeu repose sur l'élasticité des métaux.

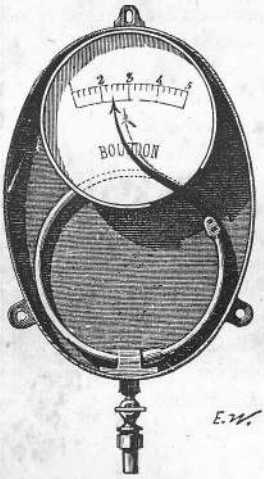


Fig. 119. — Manomètre métallique.

Fig. 120.

Le manomètre de Bourdon (*fig.* 119 et 120) se compose d'un tube métallique à paroi mince et à section elliptique. Ce tube est enroulé en spirale, comme le montre la figure 120 : l'une de ses extrémités communique avec la chaudière, au moyen d'un robinet; son autre extrémité est libre, et fermée par une pièce métallique qui porte une aiguille, comme le montre la figure 119. Lorsque la pression intérieure augmente, la spirale tend à s'ouvrir, et l'extrémité du tube entraîne l'aiguille sur un cadran divisé, où les pressions sont marquées en kilo-

(*) Les points de division peuvent être déterminés par le calcul, en supposant que le tube soit bien cylindrique à l'intérieur, de sorte qu'on puisse représenter les volumes de l'air par les longueurs qu'il occupe. — Soit l la longueur du tube, depuis le sommet M jusqu'au niveau du mercure dans la cuvette, niveau que nous supposerons invariable ; soit x la longueur du tube qui est occupée par l'air, pour une valeur H de la pression, exprimée en hauteur de mercure. Cet air occupait un volume représenté

grammes. La graduation est faite, pour chaque instrument, par comparaison avec un manomètre déjà construit.

144. Manomètres de Regnault. — On doit à Regnault diverses dispositions qui permettent de mesurer les pressions des gaz, dans les recherches précises, avec une grande exactitude.

Nous rappellerons d'abord l'emploi du grand tube ouvert (*fig.* 115) dans l'étude de la loi de Mariotte; il a permis de mesurer, avec une précision constante, des pressions qui ont atteint 30 atmosphères.

Pour mesurer des pressions comprises entre 1 et 3 atmosphères, Regnault a fréquemment employé le manomètre à air libre représenté par la figure 121. Le tube A est mis en communication avec l'enceinte qui contient le gaz ou la vapeur soumis à l'expérience; le tube F s'ouvre dans l'atmosphère. La différence h des niveaux du

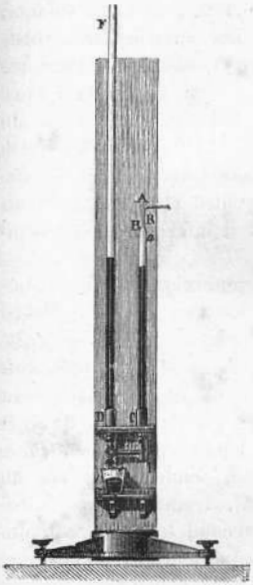


Fig. 121.

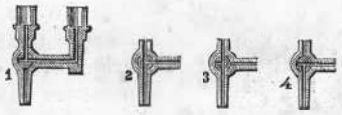


Fig. 122.

mercure dans les deux tubes, mesurée au cathétomètre, donne, avec l'observation de la hauteur barométrique H, la hauteur $H + h$ qui mesure la pression du gaz dans l'enceinte.

par l sous la pression atmosphérique h; il occupe un volume représenté par x sous la pression $H - (l - x)$; on a donc, d'après la loi de Mariotte :

$$\frac{x}{l} = \frac{h}{H - l + x},$$

ce qui donne l'équation

$$x^2 + x(H - l) - lh = 0$$

$$x = \frac{H - l}{2} \pm \sqrt{\left(\frac{H - l}{2}\right)^2 + lh}.$$

Ces deux valeurs de x sont réelles, mais celle qui correspond au signe — du radical est négative, et ne peut pas convenir; le signe + doit donc seul être conservé. En prenant successivement pour valeurs de H les multiples de 75^{cm},5, on saura à quelles distances de M on devra marquer les pressions successives, en kilogrammes.

On pourrait encore tenir compte de l'abaissement du mercure dans la cuvette, étant donné le rapport du diamètre de la cuvette à celui du tube : nous laisserons au lecteur le soin de résoudre cette question, qui n'offre aucune difficulté, et qui conduit, en prenant la même inconnue, à une équation semblable.

Pour la commodité des manipulations, la pièce de fer dans laquelle les deux tubes sont mastiqués présente un *robinet à trois voies*, qui, par les quatre positions indiquées par la figure 122, permet, à volonté, d'établir la communication entre les deux tubes (position 1), ou de faire écouler le mercure des deux tubes à la fois (position 2), ou de le faire écouler seulement du tube de gauche ou du tube de droite (position 3 ou position 4). — On voit enfin que, si ce robinet est tourné à 45 degrés de l'une de ces quatre positions, les trois voies sont fermées, et il intercepte toute communication.

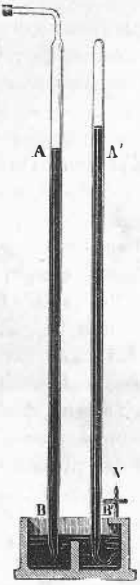


Fig. 123.
Manomètre barométrique.

145. Manomètre barométrique. — Le manomètre qui vient d'être décrit peut également servir à mesurer des pressions inférieures à une atmosphère. Mais pour la mesure des pressions faibles, Regnault a employé plus ordinairement la disposition indiquée par la figure 123, et connue sous le nom de *manomètre barométrique*. — Une cuvette de fonte, semblable à celle du baromètre fixe (*fig.* 98), reçoit un tube barométrique A'B', et un second tube AB, communiquant par sa partie supérieure avec l'enceinte qui contient le gaz ou la vapeur. A mesure que la pression devient moindre dans cette enceinte, le mercure s'élève dans ce tube : la mesure de la différence des niveaux A et A', effectuée au cathétomètre, donne la valeur de la pression.

III. — MÉLANGE DES GAZ.

146. Diffusion des gaz. — Les divers liquides ne peuvent pas toujours se mélanger entre eux. Si l'alcool et l'eau se mêlent intimement, l'eau et le mercure ne peuvent se pénétrer de la même façon : lorsqu'on cherche à effectuer le mélange par l'agitation, le mercure, suspendu d'abord en gouttelettes au milieu de l'eau, se rassemble par le repos à la partie inférieure, de manière que la surface de séparation des deux liquides arrive toujours à être nettement déterminée. — Il n'en est pas de même des gaz. Deux gaz, mis en présence l'un de l'autre, tendent toujours à se mélanger, alors même qu'ils seraient, à l'origine, superposés de façon que leur différence de densité tendit à les maintenir séparés. C'est ce que montre l'expérience suivante, qui est due à Berthollet. — On plaça dans les caves de l'Observatoire,

c'est-à-dire dans un lieu à température constante, deux ballons à robinet (*fig.* 124), vissés l'un au-dessus de l'autre : le ballon supérieur contenait de l'hydrogène ; le ballon inférieur, de l'acide carbonique, dont la densité est vingt-deux fois plus grande ; chacun des gaz avait été introduit sous une pression exactement égale à la pression atmosphérique. Les robinets ayant été ouverts, le mélange s'effectua de façon que, au bout d'un temps suffisant, chacun des deux ballons contint les deux gaz en proportions sensiblement égales. — Donc, quand deux gaz sont mis en présence, la force élastique de chacun d'eux a toujours pour résultat de lui faire occuper la capacité totale de l'enveloppe, sans que la présence de l'autre gaz soit un obstacle à cette expansion. — Cette pénétration des gaz les uns par les autres a reçu le nom de *diffusion* (*).

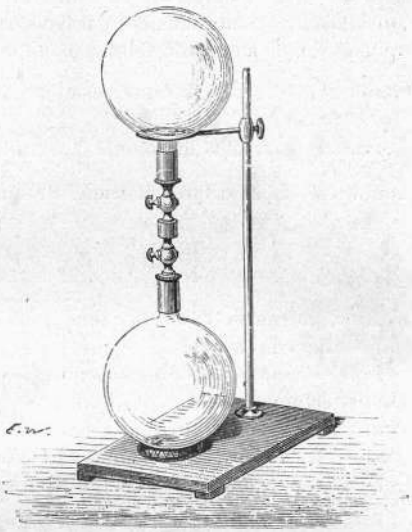


Fig. 124. — Expérience de Berthollet.

Ces phénomènes expliquent comment les odeurs dues à des gaz ou à des vapeurs se répandent dans l'air avec tant de rapidité. — Ils permettent aussi de concevoir comment les vapeurs d'un liquide volatil peuvent se former dans un espace occupé déjà par un gaz, à peu près comme elles le feraient dans un espace vide.

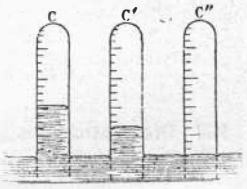


Fig. 125.

147. Loi du mélange des gaz. — *Dans un mélange de plusieurs gaz, la force élastique est égale à la somme des forces élastiques de tous les gaz, considérés chacun comme occupant le volume du mélange tout entier.* — Cette loi, énoncée vers 1805 par Dalton, peut se démontrer de la manière suivante :

Plaçons sur le mercure plusieurs éprouvettes C, C', C''.... (*fig.* 125), graduées en parties d'égales capacités, et contenant différents gaz :

(*) Il va sans dire que, si les gaz sont superposés de façon que le plus dense soit à la partie supérieure, la diffusion se fait plus vite ; mais la seule différence est dans la rapidité avec laquelle la pénétration a lieu, et non dans le résultat définitif.

mesurons, dans chacune d'elles, les volumes des gaz v, v', v''..., au moyen des graduations, et les pressions p, p', p''..., au moyen des hauteurs des colonnes de mercure et de la hauteur barométrique. Introduisons ensuite tous ces gaz dans une même éprouvette, et faisons occuper au mélange un volume V; si le premier gaz occupait seul le volume V, sa force élastique serait $p\frac{v}{V}$; de même les forces élastiques des autres gaz, sous le volume V, seraient $p'\frac{v'}{V}$, $p''\frac{v''}{V}$, ... Si la loi de Dalton est vraie, la force élastique P du mélange doit donc être

$$P = p\frac{v}{V} + p'\frac{v'}{V} + p''\frac{v''}{V} + \ldots;$$

c'est ce que vérifie la mesure directe de la pression, dans l'éprouvette qui contient le mélange.

148. — L'énoncé de cette loi peut être présenté sous une autre forme, qui est commode pour la résolution de certaines questions : *Le volume d'un mélange de gaz est égal à la somme des volumes de tous les gaz, considérés chacun comme soumis à la pression totale du mélange.*

En effet, l'équation précédente peut s'écrire

$$PV = pv + p'v' + p''v'' + \ldots :$$

d'où l'on tire

$$V = v\frac{p}{P} + v'\frac{p'}{P} + v''\frac{p''}{P}\cdots,$$

formule qui est la traduction du dernier énoncé.

IV. — MÉLANGE DES LIQUIDES ET DES GAZ.

149. Dissolution des gaz dans les liquides. — L'eau, mise en présence d'une atmosphère d'un gaz pur, d'oxygène par exemple, en absorbe une quantité déterminée, quantité qui augmente avec la pression du gaz; le gaz absorbé se dégage lorsqu'on vient à faire le vide à la surface du liquide, et il reste de l'eau pure. — Ce phénomène ne présente aucun des caractères des actions chimiques : les molécules du gaz semblent simplement pénétrer entre celles de l'eau; la force élastique du gaz reste même encore manifeste, puisqu'il abandonne le liquide, ou y pénètre de nouveau, selon que la pression exercée par ce gaz lui-même, à l'extérieur, diminue ou augmente. — C'est aux phénomènes présentant ce caractère que nous donnerons le nom de *dissolution des gaz.*

150. Première loi de Dalton : dissolution d'un gaz dans un liquide. — Coefficient de solubilité. — *Les quantités d'un gaz dissoutes par l'unité de volume d'un liquide sont proportionnelles à la pression que ce gaz exerce sur la surface du liquide.*

Nous appellerons *coefficient de solubilité* d'un gaz dans un liquide, *à une température déterminée t*, le nombre qui exprime le volume de gaz, mesuré sous la pression normale, que peut dissoudre, à la température *t* et sous cette pression normale, l'unité de volume du liquide (*).

Les coefficients de solubilité des divers gaz dans l'eau offrent des différences considérables; ainsi, 1 litre d'eau à 15° absorbe, sous la pression normale, $0^{lit},030$ d'oxygène, $0^{lit},015$ d'azote, 1 litre d'acide carbonique, et 670 litres de gaz ammoniac.

151. Deuxième loi de Dalton : dissolution d'un mélange de plusieurs gaz. — *Lorsqu'un mélange de plusieurs gaz est en contact avec un liquide, chacun d'eux se dissout avec son coefficient de solubilité propre, et proportionnellement à la pression qui doit lui être attribuée dans le mélange.* C'est ce qu'on exprime quelquefois en disant que chacun des gaz se dissout *comme s'il était seul.*

Cette loi a été vérifiée dans des circonstances très diverses. — Nous nous contenterons d'indiquer la vérification qui consiste à en déduire, *à priori*, les proportions relatives d'oxygène et d'azote qui doivent se dissoudre dans l'eau au contact de l'air atmosphérique.

Un volume quelconque d'air atmosphérique, mesuré sous une pression quelconque H, contient environ $\frac{4}{5}$ d'oxygène et $\frac{4}{5}$ d'azote, mesurés sous la même pression. Chacun de ces gaz étant considéré comme occupant le volume tout entier, la force élastique partielle de chacun d'eux est représentée, pour le premier, par $\frac{4}{5}$ H; pour le second, par $\frac{4}{5}$ H. Leurs coefficients de solubilité, à la température de 15° par

(*) La loi de Dalton et la définition du coefficient de solubilité peuvent être énoncées d'une manière un peu différente. — Soit α le coefficient de solubilité, défini comme on vient de le faire, et v le volume de gaz qui se dissout dans l'unité de volume du liquide, sous une pression h. On aura, d'après la loi de Dalton :

$$v = \alpha . \frac{h}{76} ;$$

on en déduit

$$\frac{v . 76}{h} = \alpha .$$

Or, le premier membre exprime le volume que prendrait, *sous la pression h*, la quantité de gaz absorbée par l'unité de volume du liquide; on voit que ce volume est toujours représenté par la constante α. — On peut donc énoncer la loi de la dissolution, en disant que l'*unité de volume du liquide absorbe, sous une pression quelconque* h, *un volume constant du gaz, ce volume étant toujours évalué sous la pression* h. — La valeur de ce volume constant n'est autre que le *coefficient de solubilité.*

Il est aisé de voir qu'on peut encore définir le *coefficient de solubilité* comme étant le rapport de la force élastique du gaz dissous, considéré comme occupant le volume du liquide tout entier, à la force élastique du gaz qui presse sur la surface du liquide

exemple, étant 0,030 et 0,015, un litre d'eau doit dissoudre, sous la pression totale H, des quantités de chaque gaz qui, mesurées sous la pression de 76 centimètres, seraient représentées par

$$0^{lit},030 \times \frac{\frac{4}{5}H}{76} \text{ d'oxygène,}$$

$$0^{lit},015 \times \frac{\frac{4}{5}H}{76} \text{ d'azote.}$$

Le rapport de ces deux volumes est indépendant de H; la *composition* du mélange gazeux extrait de l'eau doit donc être indépendante de la pression sous laquelle la dissolution s'est effectuée. — Ce rapport est égal à $\frac{0,030}{0,012}$ ou $\frac{1}{2}$. L'analyse du mélange gazeux extrait de l'eau montre en effet que, après l'élimination de l'acide carbonique que l'eau tient en dissolution, ce mélange est formé de $\frac{1}{3}$ d'oxygène et $\frac{2}{3}$ d'azote. Il est plus riche en oxygène que l'air.

Quant à la quantité *absolue* de gaz dissoute dans un litre d'eau, elle varie proportionnellement à la pression H. Sous une pression de 76 centimètres, en particulier, les expressions précédentes fournissent $0^{lit},006$ d'oxygène et $0^{lit},012$ d'azote. Donc, en tout, 18 centimètres cubes de gaz. — C'est là, en effet, le résultat que fournissent les eaux pures et bien aérées, recueillies dans les pays de plaines, quand on en extrait les gaz par l'ébullition, comme on l'indique dans les Cours de chimie.

152. Applications. — Les lois précédentes expliquent comment les eaux des lacs ou des sources dissolvent les gaz de l'air en quantités variables, selon la pression de l'atmosphère. Au sommet des montagnes, les eaux sont beaucoup moins aérées que dans les pays de plaines : il est probable, d'après Boussingault, que l'usage de ces eaux peu aérées est l'une des causes de la production du goitre.

Certaines sources d'eaux minérales laissent dégager des gaz, et en particulier des bulles d'acide carbonique, qui les rendent effervescentes : ces gaz s'échappent quand l'eau arrive au contact de l'air, qui n'en contient que des traces. — Les eaux gazeuses artificielles s'obtiennent en comprimant de l'acide carbonique dans de l'eau, au moyen de pompes, jusqu'à une pression d'environ 5 atmosphères. — Les vins mousseux, la bière, le cidre, contiennent également en dissolution de l'acide carbonique, produit par la fermentation qui s'est continuée dans les bouteilles après qu'elles ont été bouchées. Quand on les débouche, la plus grande partie du gaz dissous se dégage progressivement, en produisant une mousse qui est due à la viscosité du liquide (*).

(*) On remarque cependant qu'un liquide chargé d'une grande quantité de gaz dissous ne laisse pas dégager immédiatement tout l'excès de gaz, au moment où ce

153. Actions des solutions salines sur les gaz. — Quand on met les gaz en présence des solutions salines, les quantités de gaz absorbées semblent le plus souvent se soustraire aux lois de la dissolution. — Ces actions ont été étudiées par M. É. Fernet, dans divers cas particuliers. Voici quelques-uns des résultats obtenus.

Dans la plupart des cas, l'action des solutions salines sur les gaz est un phénomène complexe, dépendant à la fois de la dissolution simple et de la combinaison chimique; le volume de gaz absorbé se compose de deux termes, dont l'un varie proportionnellement à la pression, l'autre est indépendant de la pression et est proportionnel à la quantité de sel dissoute. Le coefficient de *solubilité propre*, qui entre dans le premier de ces deux termes, est toujours moindre que celui de l'eau pure pour le même gaz, et diminue à mesure que la quantité de sel augmente.

De là résulte : 1° que, *pour les gaz qui ne peuvent pas se combiner chimiquement* avec le sel dissous, l'absorption totale est toujours moindre que dans l'eau, et suit d'ailleurs la loi de la dissolution (150). Tel est le cas des solutions de chlorure de sodium (sel marin), mises en présence de l'oxygène ou de l'air : la présence de ce sel peut donc être considérée comme diminuant l'absorption de ces gaz par l'eau. — 2° Au contraire, *si le gaz peut se combiner* avec le sel, en proportion un peu considérable, l'influence de la pression sur le phénomène devient relativement presque insensible, et ne peut être observée que par des méthodes assez délicates. Tel est le cas des solutions de phosphate de soude ou de carbonate de soude, mises en présence de l'acide carbonique; bien que ces sels diminuent la solubilité propre du gaz, leur présence a pour effet d'augmenter considérablement le pouvoir absorbant total du liquide, et de rendre l'absorption presque indépendante de la pression.

Ces résultats fournissent l'explication d'un grand nombre de phénomènes naturels. — Les eaux des sources, des rivières, des lacs, des mers, tiennent en dissolution un certain nombre de sels, dont l'influence s'ajoute à celle de l'altitude (152), pour faire varier les quantités d'air qu'elles absorbent, et leurs qualités comme boisson. — De là résulte aussi que ces diverses eaux ne sont pas également propres à fournir les gaz nécessaires à la respiration des animaux aquatiques.

Enfin, ces principes trouvent une application immédiate dans la théorie même de la respiration. En effet, la partie liquide du sang, qui vient, dans les organes respiratoires, absorber les gaz de l'air pour les transmettre aux globules, ou qui rend à l'air l'acide carbonique abandonné par les globules, ne se comporte pas à l'égard de ces gaz comme le ferait l'eau pure : parmi les sels qui s'y trouvent en dissolution, les uns augmentent le pouvoir absorbant de l'eau pour les gaz de la respiration, les autres le diminuent. On

liquide se trouve au contact de l'air : on dit alors qu'il reste *sursaturé*. — Mais si l'on vient à agiter vivement, le dégagement de gaz recommence, et la sursaturation tend à se détruire. Il en est de même quand on y introduit un corps solide : chacun a pu observer, par exemple, l'effervescence que l'on produit dans de l'eau de Seltz ou dans du vin de Champagne, quand on y plonge un biscuit ou même un grain de raisin. — M. Gernez a montré que, dans tous les phénomènes de ce genre, l'influence du corps solide est due à l'air qui est condensé à sa surface, et qui forme une sorte d'atmosphère intérieure dans laquelle le gaz peut se dégager. Ainsi, un fil de platine peut produire un effet semblable; mais il cesse de produire cet effet si on l'a chauffé préalablement au rouge, puis refroidi brusquement dans l'eau, de manière à empêcher l'air de se condenser à sa surface.

s'explique ainsi comment, si certains de ces sels viennent à s'écarter des proportions normales, ces variations coïncident avec une suractivité ou un ralentissement de la fonction respiratoire.

V. — EXTENSION DU PRINCIPE D'ARCHIMÈDE AUX GAZ. — AÉROSTATS.

154. Poussée éprouvée par les corps plongés dans les gaz. — La démonstration du principe d'Archimède, donnée pour les corps plongés dans les liquides (88), s'applique aux corps plongés dans les gaz. — *Tout corps plongé dans un gaz éprouve une poussée de bas en haut, égale en grandeur au poids de gaz qu'il déplace.*

Ce principe est applicable, en particulier, aux corps plongés dans l'air. — Il en résulte que tout corps dont le poids surpasse celui de l'air déplacé doit être considéré comme sollicité par une force dirigée de haut en bas, son *poids apparent dans l'air*, qui est l'excès de son poids réel sur le poids du gaz déplacé. Ce cas est celui des corps solides ou liquides. — On dit encore quelquefois que le corps plongé dans l'air *perd une partie de son poids*, égale au poids d'air déplacé.

Au contraire, si le poids du corps est plus petit que celui de l'air déplacé, le corps s'élève comme s'il était sollicité, de bas en haut, par une force égale à la différence entre la poussée et son poids. Tel est le cas des bulles de savon gonflées avec de l'hydrogène.

155. Vérification expérimentale. — La poussée de l'air sur les corps qui y sont plongés peut être constatée par l'expérience suivante :

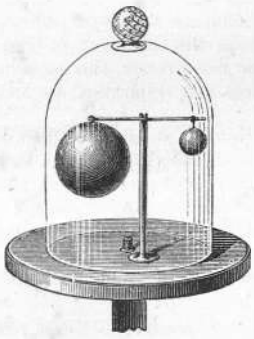


Fig. 126. — Baroscope.

Aux deux extrémités d'un petit fléau de balance (*fig.* 126) sont suspendues deux sphères métalliques creuses, dont les volumes sont très inégaux, mais dont les poids sont peu différents. La virole qui soutient la petite sphère peut se mouvoir sur un pas de vis, pratiqué sur le fléau : on règle la distance de cette virole au point de suspension, de façon que le fléau se tienne horizontal lorsque l'appareil est dans l'air. On place alors l'instrument sous une cloche, dans laquelle on fait le vide au moyen de la machine pneumatique : à mesure que l'air se raréfie, on voit le fléau s'incliner du côté de la grosse sphère : il redevient horizontal quand on laisse rentrer l'air. — C'est bien là le résultat que l'on pouvait prévoir; en effet, en enlevant l'air de la cloche, on supprime les poussées qu'il exerçait sur les deux sphères, et qui intervenaient dans l'équilibre horizontal du fléau; or, la poussée étant plus

grande pour la sphère qui a le plus grand volume, l'équilibre ne peut subsister dans le vide, et le fléau doit s'incliner du côté de la grosse sphère.

Cet appareil, connu sous le nom de *baroscope*, avait été imaginé par Otto de Guericke pour constater, par les variations d'inclinaison du fléau, les variations de la pression atmosphérique. — Il faudrait, pour qu'il pût servir à cet usage, lui donner une grande sensibilité.

156. Corrections des pesées effectuées dans l'air. — Tout corps plongé dans l'air éprouvant une poussée de bas en haut, les pesées qu'on effectue dans l'air doivent, pour fournir des résultats exacts, subir une correction.

Désignons par x la masse du corps qui a été soumis à la pesée; soit M la somme des masses des *poids marqués* qu'on a employés pour établir l'équilibre. La pesée ayant eu lieu dans l'air, nous allons écrire que les *poids apparents* du corps et des poids marqués sont égaux. — Soit D la densité du corps, Δ celle du métal dont sont faits les poids marqués, et a la masse du centimètre cube d'air. Le volume du corps est $\frac{x}{D}$, la masse d'air déplacée est $\frac{x}{D}a$; le poids du corps dans le vide est xg, la poussée qu'il éprouve de la part de l'air est $\frac{x}{D}ag$; son poids apparent est donc $x\left(1-\frac{a}{D}\right)g$. De même, le poids apparent des poids marqués est $M\left(1-\frac{a}{\Delta}\right)g$. — On a donc :

$$x\left(1-\frac{a}{D}\right)g = M\left(1-\frac{a}{\Delta}\right)g;$$

$$x = M\,\frac{1-\frac{a}{\Delta}}{1-\frac{a}{D}}.$$

La correction consiste donc à prendre, pour valeur de x, non pas le nombre M fourni par la pesée, mais le produit de ce nombre par un facteur dans lequel les densités D et Δ sont supposées connues. — Quant à la densité a de l'air, lorsqu'il s'agit de pesées effectuées sur des corps *solides* ou *liquides*, on peut remplacer a par 0,0013, qui est la densité de l'air à 0° et sous la pression 76; en effet, dans ce cas, les *variations* que peut éprouver la poussée due à l'air, quand la pression et la température s'écartent un peu de ces valeurs, sont négligeables à côté du poids de la masse x.

Au contraire, si le corps à peser était *un gaz*, la poussée serait du même ordre de grandeur que le poids : alors, les plus petites varia-

tions dans la densité de l'air extérieur ayant une influence appréciable, l'approximation qui précède ne serait plus suffisante, et on devrait remplacer a par la valeur de la densité de l'air *au moment de l'expérience*. — Mais, dans ce cas, il est préférable d'éviter cette correction, en employant une *tare compensée*, comme nous l'indiquerons à propos de la détermination de la densité des gaz (livre II, chap. III).

Nous verrons également plus loin comment on tient compte de la poussée de l'air pour déterminer, d'une manière rigoureuse, les densités des corps solides ou liquides (livre II, chap. IV).

157. Aérostats. — On donne le nom général d'*aérostats* à des appareils formés d'une enveloppe mince, contenant un gaz moins dense que l'air : si le poids total du gaz, de l'enveloppe et des divers accessoires est moindre que le poids de l'air déplacé, la poussée l'emporte sur le poids et l'appareil tend à s'élever dans l'atmosphère.

Les *montgolfières* sont des aérostats gonflés avec de l'air chaud. — Les premiers appareils de ce genre furent construits, en 1780, par les frères Montgolfier (Joseph et Étienne), fabricants de papier à Annonay. C'étaient des globes de toile, doublés de papier, et ayant une douzaine de mètres de diamètre. On allumait un grand feu au-dessous d'une large ouverture pratiquée à la partie inférieure; on y suspendait ensuite un panier en fils de fer, rempli de matières en combustion, pour entretenir la température de l'air intérieur. — Ces appareils ont le grand inconvénient d'être trop dangereux pour que des aéronautes puissent s'aventurer dans des ascensions de ce genre. Malgré ces dangers, de semblables ascensions furent entreprises un certain nombre de fois, et quelques-unes coûtèrent la vie aux voyageurs.

158. Ballons. — Les *ballons* sont des aérostats gonflés avec de l'hydrogène, ou avec le gaz d'éclairage. — C'est avec des globes de papier remplis d'hydrogène qu'avaient été faites les premières expériences des frères Montgolfier. Peu de temps après, et sans connaître le gaz employé par eux, le physicien Charles enleva dans les airs, au Champ de Mars, à Paris, un ballon gonflé avec de l'hydrogène : l'enveloppe avait 4 mètres de diamètre.

Les ballons que l'on construit aujourd'hui (*fig.* 127) ont des dimensions beaucoup plus considérables; l'enveloppe est formée soit de taffetas verni, soit de feuilles de caoutchouc et de taffetas superposées. Le ballon est couvert d'un filet, qui supporte une nacelle destinée à recevoir les aéronautes, le lest et tous les objets nécessaires au voyage. — Pour gonfler le ballon, on commence par l'aplatir pour en chasser l'air, et on y fait arriver le gaz par une ouverture qu'il présente à sa partie inférieure.

159. Force ascensionnelle, au départ. — On nomme *force ascensionnelle* d'un aérostat, à un instant déterminé, la différence entre la poussée due à l'air qui l'environne et son poids total.

Pour que l'ascension se fasse dans les conditions convenables, il est bon que cette force ascensionnelle, mesurée avant le départ à l'aide d'un dynamomètre, ne représente qu'une force de quelques kilogrammes. — Il faut remarquer enfin que l'enveloppe doit toujours être assez vaste pour que le ballon puisse s'élever *avant d'être complètement distendu* : en effet, si le volume du ballon ne pouvait plus s'accroître, dans des régions de l'atmosphère où la pression est moindre, la pression intérieure pourrait amener la déchirure de l'enveloppe.

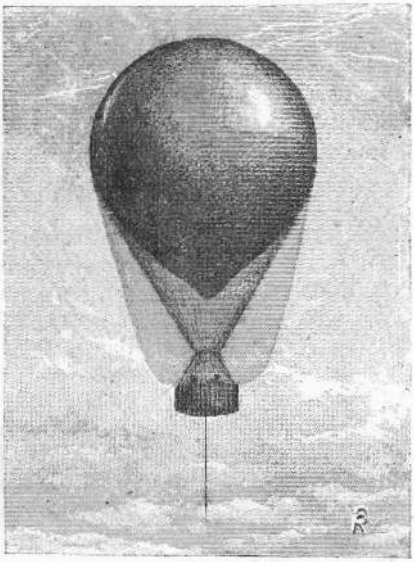


Fig. 127. — Ballon.

160. Variations de la force ascensionnelle pendant l'ascension. — Si l'enveloppe est assez vaste pour continuer toujours à se distendre, à mesure que le ballon s'élève, son volume varie en raison inverse de la pression extérieure ; mais, comme le poids spécifique de l'air qu'il déplace varie proportionnellement à la pression, il en résulte que la poussée, c'est-à-dire le produit du volume de cet air par son poids spécifique, ne change pas. On voit donc qu'un ballon n'emportant aucun accessoire, et formé d'*une enveloppe parfaitement imperméable*, conserverait une force ascensionnelle sensiblement *constante*. — Pour un ballon muni de ses accessoires, la diminution de force ascensionnelle, pendant qu'il s'élève, devrait être produite uniquement par la diminution de la poussée éprouvée, dans un milieu plus rare, par les corps *non gazeux* du système : l'aérostat conserverait donc encore une force ascensionnelle *presque égale* à celle qu'il aurait reçue au départ.

Mais l'hypothèse de l'imperméabilité de l'enveloppe est loin d'être réalisée, au moins dans la plupart des cas. L'expérience a montré qu'une partie de l'hydrogène s'échappe dans l'atmosphère, et est remplacée par de l'air. Or, d'après les lois suivant lesquelles s'effectue cet échange de gaz, l'air qui pénètre dans le ballon a, à la fois, *un volume moindre* et *un poids plus grand* que l'hydrogène qui s'échappe. De là, une *diminution de poussée* et un *accroissement de*

poids, c'est-à-dire une diminution rapide dans la force ascensionnelle.

Les aéronautes, une fois qu'ils sont parvenus à une certaine hauteur, n'ont plus aucun point fixe qui leur permette de constater si le ballon continue à monter, ou s'il cesse de monter : ils ont recours à l'observation du baromètre qui leur permet d'évaluer approximativement, à chaque instant, la hauteur à laquelle ils se trouvent (131). — Quand ils veulent accélérer le mouvement d'ascension, ils jettent une partie du sable qui sert de lest. — Quand ils veulent descendre, ils laissent échapper du gaz, en ouvrant, à l'aide d'une corde, une soupape disposée à la partie supérieure du ballon : alors, le volume du ballon devenant progressivement moindre, la poussée diminue et la descente commence.

C'est en réglant ainsi les mouvements d'ascension et de descente, qu'on arrive à maintenir le ballon dans l'air, jusqu'à ce qu'il se trouve au-dessus d'un lieu où l'on puisse toucher terre sans danger.

161. Calcul de la force ascensionnelle. — La force ascensionnelle peut être déterminée *à priori* par le calcul.

Supposons, par exemple, qu'il s'agisse d'un ballon gonflé avec *de l'hydrogène*. Prenons comme unité de force le poids du kilogramme. Le poids d'un mètre cube d'air, à 0° et sous la pression de 76 centimètres, est d'environ $1^{kil},3$; le poids d'un mètre cube d'hydrogène, dans les mêmes conditions, est $1^{kil},3 \times 0,0692$. Soit V le volume du gaz introduit, exprimé en mètres cubes, sous la pression H de l'air environnant, exprimée en centimètres de mercure; soit v le volume, en mètres cubes, de tous les corps non gazeux du système, et P leur poids. Admettons, pour plus de simplicité, que la température soit partout de 0°. Pour calculer le poids du gaz intérieur, ramenons son volume à la pression de 76 centimètres; il deviendra $V\frac{H}{76}$; son poids est donc $1^{kil},3 \times 0,0692 \times V\frac{H}{76}$. Le poids de l'air déplacé par l'enveloppe est de même $1^{kil},3 \times V\frac{H}{76}$. Enfin, le poids de l'air déplacé par les corps non gazeux est $1^{kil},3 \times v\frac{H}{76}$. La force ascensionnelle est donc :

$$1^{kil},3\,(1 - 0,0692)\,V\frac{H}{76} + 1^{kil},3 \times v\frac{H}{76} - P.$$

En général, on considère comme déterminés à l'avance les objets que le ballon doit enlever, en sorte que P est connu, ainsi que v. On égale donc l'expression précédente à la force ascensionnelle A que l'on veut obtenir, et l'on a ainsi une équation d'où l'on peut tirer la valeur de V, c'est-à-dire du nombre de *mètres cubes* de gaz qu'il faudra introduire dans le ballon. — Quant au volume à donner au ballon lui-même,

supposé *distendu*, il doit être plus considérable, comme nous l'avons montré (159) : on fait en sorte que ce volume surpasse, d'un tiers environ, la valeur de V qui est fournie par le calcul, c'est-à-dire qu'on donne à l'enveloppe une capacité au moins égale à $\frac{4}{3}$ V.

Si le gaz employé est le *gaz d'éclairage*, dont le mètre cube pèse environ $1^{kil},3 \times 0,55$, la force ascensionnelle est donnée de même par l'expression :

$$1^{kil},3\,(1 - 0,55)\,V\,\frac{H}{76} + 1^{kil},3 \times v\,\frac{H}{76} - P.$$

La quantité entre parenthèses a une valeur beaucoup moindre que dans l'expression précédente; en sorte que, avec les mêmes valeurs de P et de v, on est obligé de donner au volume V une valeur beaucoup plus grande. Le prix de l'enveloppe est, par cela même, plus considérable; mais le prix du gaz est beaucoup moindre, et c'est là surtout ce qui est à considérer quand un même ballon doit être employé pour un certain nombre d'ascensions. — On ne fait guère usage de l'hydrogène que pour les ascensions destinées à atteindre une grande hauteur.

162. — Comme question théorique, on peut encore se proposer de construire l'aérostat de façon qu'il arrive en équilibre à une hauteur déterminée dans l'atmosphère, sans que rien ait été changé à son poids. — Soit H′ la valeur de la pression, approximativement connue à cette hauteur (151), et V′ le volume correspondant du gaz, c'est-à-dire le volume que doit atteindre le ballon dans sa distension maximum. La force ascensionnelle devant être nulle à ce moment, on aura, pour un ballon gonflé avec de l'hydrogène :

$$1^{kil},3\,(1 - 0,0692)\,V'\,\frac{H'}{76} + 1^{kil},3 \times v\,\frac{H'}{76} - P = 0,$$

équation qui donnera le volume V′, du ballon *distendu*. — Il sera facile d'en déduire le volume de gaz qu'il faut y introduire, sous la pression H, à la surface du sol, au moment du départ.

CHAPITRE VI

POMPES A GAZ ET A LIQUIDES. — SIPHON

I. — MACHINES SERVANT A RARÉFIER OU A COMPRIMER LES GAZ.

163. Machine pneumatique. — C'est à Otto de Guericke, bourgmestre de Magdebourg, que paraît due la première réalisation, en 1654, d'un instrument destiné à extraire l'air des appareils, ou d'une *pompe à gaz*. On a fait subir, à l'appareil qu'il avait imaginé, un grand nombre de modifications : nous décrirons d'abord la machine qui est le plus fréquemment employée.

Deux corps de pompe en cristal C et C′ (*fig.* 128), contenant chacun un piston, communiquent par leur partie inférieure avec un seul et même conduit en fonte A, qui vient s'ouvrir en O au centre d'un plateau *p*, ou *platine;* la platine est formée d'un disque de cristal, dressé à l'émeri, sur lequel on applique les cloches dans lesquelles on veut faire le vide. Un pas de vis, pratiqué à l'extrémité O du conduit, permet également de le mettre en communication avec les appareils dont on veut enlever les gaz. Nous appellerons *récipient* l'espace dans lequel la machine doit opérer la raréfaction.

Les deux corps de pompe étant semblables, il nous suffira de décrire l'un d'eux. Le piston est formé de rondelles de cuir serrées entre deux plaques métalliques *dd′*, *ee′* (*fig.* 129), de façon que le cuir s'applique exactement sur la paroi du corps de pompe. La pièce métallique qui forme le noyau du piston est creusée, suivant l'axe, d'un canal qui la traverse entièrement : ce canal contient un petit disque de métal *g*, qui est maintenu faiblement appliqué sur les bords de l'ouverture *a* par un petit ressort à boudin. Le piston est traversé par une tige métallique *hh*, qui y passe à frottement dur; cette tige porte à sa partie inférieure un bouchon conique de métal, qui peut s'engager dans l'entrée *b* du conduit; à sa partie supérieure, cette même tige porte un arrêt *i*, qui viendra buter contre la base supérieure du corps de pompe dès que le piston, en s'élevant, aura entraîné le bouchon conique à une petite distance au-dessus de l'ouverture *b*.

Des tiges à crémaillère T, T′, articulées avec les pistons, engrènent avec une même roue dentée, qu'on mettra en mouvement alternativement dans un sens et dans l'autre, à l'aide de la manivelle MM

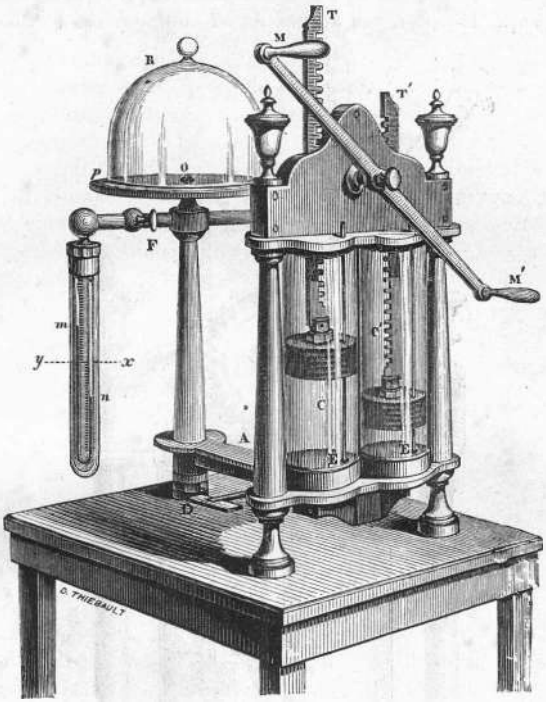


Fig. 128. — Machine pneumatique.

(*fig.* 128) : dans chacun de ces mouvements, l'un des pistons s'abaissera pendant que l'autre sera soulevé, et réciproquement.

164. Jeu de la machine. — Supposons que l'un des pistons, d'abord appliqué sur le fond du corps de pompe, vienne à être soulevé (c'est le mouvement qu'indique la figure 129 pour le piston de gauche P). Le bouchon conique est soulevé un peu au-dessus de l'ouverture *b;* mais bientôt la tige vient buter, par son arrêt *i*, contre la base supérieure du corps de pompe, et le piston continue seul à monter; l'air contenu dans le récipient se répand dans le corps de pompe, en sorte que sa force élastique va en décroissant. Pendant l'ascension du piston, le disque *g* reste appliqué sur l'ouverture *a*, par la pression atmosphérique, qui s'exerce sur sa face supérieure. — Supposons maintenant que le piston, arrivé au haut de sa course, soit abaissé : la tige *hh*, étant

immédiatement entraînée, le cône inférieur vient fermer l'ouverture *b* : l'air enfermé dans le corps de pompe, et comprimé par le piston, soulève le disque *g*, dès que sa force élastique est devenue supérieure à la pression atmosphérique, et il continue à s'échapper par l'ouverture *a* jusqu'à ce que le piston soit au bas de sa course (c'est le mouvement

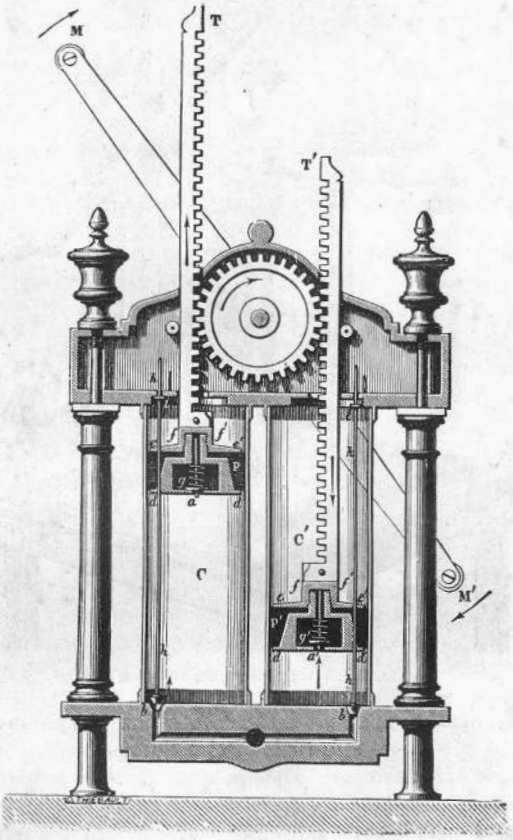


Fig. 129. — Coupe verticale des corps de pompe et des pistons.

que suppose la figure pour le piston de droite P'). — Les mêmes phénomènes se reproduisent chaque fois qu'on fait monter et descendre l'un des pistons, c'est-à-dire à chaque *coup de piston*.

165 Loi de décroissance de la force élastique, en supposant la machine parfaite. — Chaque fois que l'on fait monter l'un des pistons, une partie de l'air du récipient passe dans le corps de pompe, et en

est expulsée quand le piston redescend : on n'enlève donc, à chaque coup de piston, qu'une fraction de l'air qui était resté au coup de piston précédent. Donc, *même avec une machine parfaite*, il serait impossible d'enlever tout l'air du récipient. — Examinons d'ailleurs comment décroît la force élastique de l'air dans le récipient, après les coups de piston successifs.

Soit V le volume du récipient et des conduits, v le volume du corps de pompe quand le piston est au haut de sa course, H la pression atmosphérique, exprimée en hauteur de mercure. Quand on soulève pour la première fois le piston, l'air, qui occupait le volume V sous la pression H, occupe le volume $V + v$; si donc on désigne par h_1 la hauteur de la colonne mercurielle qui mesurerait sa pression à ce moment, elle doit satisfaire, d'après la loi de Mariotte, à la relation

$$\frac{h_1}{H} = \frac{V}{V+v}, \quad \text{d'où} \quad h_1 = H\frac{V}{V+v}.$$

De même, pour obtenir la pression h_2 après le deuxième coup de piston, il suffit de multiplier cette valeur de h_1 par $\frac{V}{V+v}$, ce qui donne $H\left(\frac{V}{V+v}\right)^2$, et ainsi de suite. Donc, en général, en désignant par h_n la force élastique de l'air après n coups de piston, on a

$$h_n = H\left(\frac{V}{V+v}\right)^n. \tag{1}$$

La fraction $\frac{V}{V+v}$ étant plus petite que l'unité, les valeurs de h_n vont en décroissant à mesure que n augmente, et en faisant n suffisamment grand, on obtiendra pour h_n une valeur aussi petite que l'on voudra. — Donc, avec une machine parfaite, la force élastique, sans devenir jamais *nulle*, pourrait devenir *aussi petite qu'on voudrait.*

166. Influence de l'espace nuisible. — Quelque soin que l'on ait apporté dans l'ajustement des pièces de la machine, il reste inévitablement, sous les pistons, quand ils sont appliqués sur le fond de leur corps de pompe, de petits intervalles qu'on désigne sous le nom d'*espace nuisible.* — Nous allons montrer que l'espace nuisible a pour effet de limiter la raréfaction.

Soit h la force élastique dans le récipient et dans le corps de pompe, le piston étant au haut de sa course, à une période déterminée de la manœuvre. — Au moment où l'on commence à abaisser le piston, on isole dans le corps de pompe une masse d'air qui occupe le volume v sous cette pression h; pour que le disque g arrive à se soulever, il faut que cet air puisse être réduit, pendant la descente du piston, à un volume x qui fasse acquérir à sa force élastique une valeur $H + \varepsilon$, un

peu supérieure à la pression atmosphérique : d'après la loi de Mariotte, ce volume est donné par la relation :

$$\frac{h}{\Pi+\varepsilon}=\frac{x}{v}, \quad \text{d'où} \quad x=v\frac{h}{\Pi+\varepsilon}.$$

Dès lors, il ne pourra y avoir expulsion d'air, qu'autant que cette valeur de x sera supérieure au volume de l'espace nuisible, que nous désignerons par u; ce qui donne la condition :

$$\frac{vh}{\Pi+\varepsilon}\geqq u, \quad \text{d'où} \quad h\geqq\frac{u}{v}(\Pi+\varepsilon), \quad \text{ou enfin} \quad h>\frac{u}{v}\Pi.$$

On voit donc que la force élastique dans le récipient ne pourra jamais descendre au-dessous d'une *limite* représentée par l'expression $\frac{u}{v}\Pi$.

Si l'on tient compte de l'espace nuisible, la loi de décroissement de la force élastique après les coups de piston successifs est représentée par une expression plus compliquée que l'expression (1). — La discussion montre que, si la machine ne présentait aucun autre défaut, sans atteindre jamais la limite de raréfaction, *on en approcherait de plus en plus*, à mesure que le nombre des coups de piston deviendrait plus grand.

167. Influence des rentrées d'air. — Pour la plupart des machines, l'imperfection la plus grave est l'existence de petits interstices livrant passage à l'air, particulièrement autour des soupapes intérieures des pistons. L'air extérieur pénétrant alors avec une vitesse d'autant plus grande que la pression intérieure devient plus faible, il arrive un moment où la quantité d'air qui rentre dans la machine devient égale à la quantité qu'on en expulse, quelle que soit la rapidité avec laquelle on fasse se succéder les coups de piston. Il n'y a plus alors *aucun avantage à continuer de faire fonctionner la machine*. — Si l'on veut conserver le vide dans le récipient, il est nécessaire de fermer la communication entre le récipient et les corps de pompe; et, d'autre part, il est utile de laisser rentrer l'air sous les pistons, afin d'éviter que la pression atmosphérique ne chasse l'huile qui les lubréfie. — C'est ce que permet de faire la *clef*, comme nous le verrons plus loin (170).

168. Avantage de l'emploi de deux corps de pompe. — Dans une machine à un seul corps de pompe, on aurait à vaincre, chaque fois qu'on soulèverait le piston, une résistance égale à la différence des pressions exercées, d'une part sur la face supérieure du piston par l'atmosphère, d'autre part sur la face inférieure par le gaz raréfié : le second terme de cette différence devenant rapidement assez faible, la manœuvre deviendrait bientôt très pénible. — Dans la disposition actuelle, les deux pistons P et P′ supportent sur leurs faces supérieures la pression de l'atmosphère : pour les faire mouvoir en sens contraire,

on n'a donc à vaincre que la différence des pressions exercées sur leurs faces inférieures, laquelle résulte, à chaque instant, de la différence des forces élastiques de l'air dans les deux corps de pompe. — Quand on a déjà donné un grand nombre de coups de piston, si l'on considère le moment où l'un des pistons arrive vers le bas de sa course, on voit que la différence de ces pressions devient encore presque égale à une atmosphère; mais, le chemin qui reste à parcourir étant très petit, le travail à développer (20) est très peu considérable.

169. Manomètre de la machine. — La machine pneumatique porte un petit manomètre (*fig.* 128) destiné à indiquer, à chaque instant, la pression de l'air qui reste dans le récipient : c'est un tube de verre à deux branches, dont l'une *m* est fermée, et qui est contenu dans une cloche de verre ou *éprouvette*, mise en communication avec le conduit. Le tube a été rempli de mercure comme un baromètre à siphon; mais, les branches n'ayant guère que 2 décimètres environ, la pression de l'atmosphère maintient le liquide appliqué contre le sommet de la branche fermée. Quand la pression dans le récipient est devenue suffisamment petite, le mercure commence à descendre dans la branche fermée et à s'élever dans la branche ouverte; la hauteur de mercure

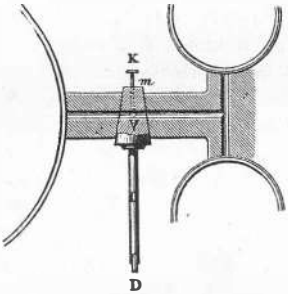


Fig. 130.

Fig. 131.

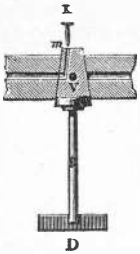


Fig. 132.

comprise entre les deux niveaux, mesure, à chaque instant, la force élastique dans le récipient.

170. Clef de la machine. — La clef est un robinet D, placé sur le conduit A de la figure 128; on y a pratiqué d'abord la voie ordinaire, qui établit la communication entre le récipient et les corps de pompe quand le robinet est ouvert (*fig.* 130). Elle présente, en outre, un petit conduit longitudinal *m*, courbé à angle droit, comme le montrent les figures 131 et 132, et destiné à servir seulement quand le robinet est fermé : on peut alors, en enlevant la cheville K, soit laisser rentrer l'air dans les corps de pompe (*fig.* 131), quand on veut maintenir le vide dans le récipient, soit laisser rentrer l'air dans le récipient

(*fig.* 152), quand l'expérience est terminée. — Des lettres gravées extérieurement sur la clef indiquent à l'opérateur ces trois positions.

171. Machine pneumatique à mercure. — La machine pneumatique à mercure, construite d'abord par Geissler, et perfectionnée en France par Alvergniat, est destinée à obtenir une raréfaction beaucoup plus parfaite que ne peut le faire la machine ordinaire.

Le tube T (*fig.* 153), renflé à sa partie supérieure A, doit fonctionner comme une sorte de tube barométrique, dont la chambre sera représentée par la capacité A; il est mis en communication, par un gros tube de caoutchouc B, avec une cuvette C s'ouvrant à l'air libre. Ce tube T est fixé sur la planche verticale qui le supporte; la cuvette C peut, au contraire, être amenée soit à la partie supérieure, soit à la partie inférieure de l'appareil, au moyen de la chaîne métallique PQ et des roues dentées que commande le volant V. Le robinet à trois voies R occupera, pendant la manœuvre, deux positions différentes, R_1 et R_2 (*fig.* 154) : dans la position R_2, il établit la communication entre la capacité A et le système de tubes qui est à la partie supérieure; dans la position R_1, il intercepte cette communication, mais il fait communiquer la capacité A avec le tube latéral, qui se termine par une petite cuvette à mercure G.

Pour mettre en jeu la machine, on commence par chasser l'air que contient le tube barométrique. Pour cela, on met le robinet R dans la position R_1, et l'on amène la cuvette C à la partie supérieure de sa course : le mercure s'écoulant de C vers A comprime cet air, et, quand la masse liquide est arrivée à l'équilibre, le gaz compris entre la surface du mercure et le robinet S est à une pression supérieure à la pression atmosphérique. On ouvre alors doucement le robinet S, de manière à livrer passage à cet air, qui s'échappe en traversant la cuvette G; le mercure du système CBA arrive ainsi à remplir complètement la capacité A jusqu'au robinet S. On ferme S, et, en faisant descendre la cuvette C jusqu'au bas de sa course, on détermine l'écoulement du mercure en sens inverse, c'est-à-dire de A vers C, ce qui produit un vide barométrique dans toute la partie supérieure de A, et la machine est prête à fonctionner (*).

Les appareils dans lesquels on se propose de raréfier l'air sont mis en communication avec le tube *a*. La manœuvre consiste dans la série suivante d'opérations. — On met le robinet R dans la position R_2 (*fig.* 154), et, en ouvrant les robinets *f* et *c*, on détermine le passage d'une partie du gaz des appareils dans la chambre barométrique : l'arrivée de ce gaz dans la chambre a pour effet de faire descendre le niveau

(*) Le robinet K, qui est représenté sur la figure 153, sert uniquement à fermer la capacité A lorsque, la machine ayant fonctionné pendant longtemps, on veut enlever le robinet R pour en renouveler le graissage, sans laisser rentrer de l'air humide dans l'appareil.

du mercure dans le tube barométrique et d'accroître ainsi l'espace dans lequel le gaz est aspiré. Lorsque le mercure a pris un nouvel équilibre dans le système de tubes ABC, on remet le robinet R dans la position R_1, on ramène la cuvette C à la partie supérieure de sa course, pour comprimer le gaz qui s'est rendu dans la capacité A, et enfin on fait échapper ce gaz dans l'atmosphère en ouvrant le robinet S. — En répétant cette manœuvre, on fait passer, à chaque fois, une certaine partie du gaz des appareils dans la machine, et de la machine dans l'atmosphère. On arrive ainsi à obtenir une pression tellement faible, que le manomètre *m* n'indique

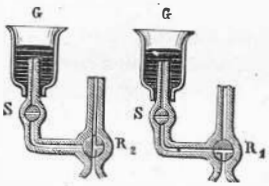


Fig. 134.

plus qu'une différence inappréciable entre les niveaux du mercure dans ses deux branches (*).

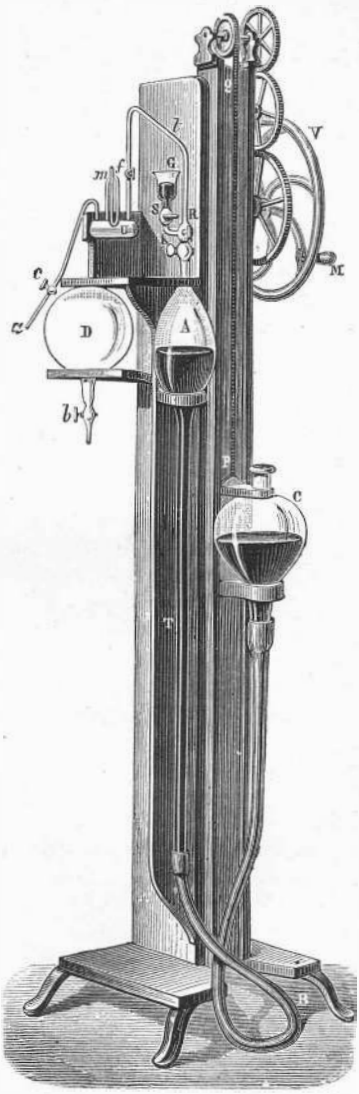


Fig. 135. — Machine pneumatique à mercure.

(*) Le réservoir U, interposé entre la machine et les appareils, contient de l'acide sulfurique concentré, pour dessécher les gaz qui pénètrent dans la machine, de manière qu'elle reste toujours parfaitement sèche. — Tous les robinets sont *en verre*, et travaillés d'une manière assez parfaite pour tenir indéfiniment le vide, à la condition qu'on ait soin de les maintenir enduits d'une légère couche de matière grasse. — Le ballon D, qui est figuré à gauche de l'appareil, ne sert que dans des circonstances spéciales, celles où l'on veut faire le vide dans des appareils contenant un gaz qui attaquerait le mercure de la machine : ce ballon est alors utilisé

172. Pompe à main. — La pompe à main est un appareil d'une construction très simple, que l'on peut employer pour obtenir une raréfaction assez grossière, dans des espaces de dimensions peu considérables.

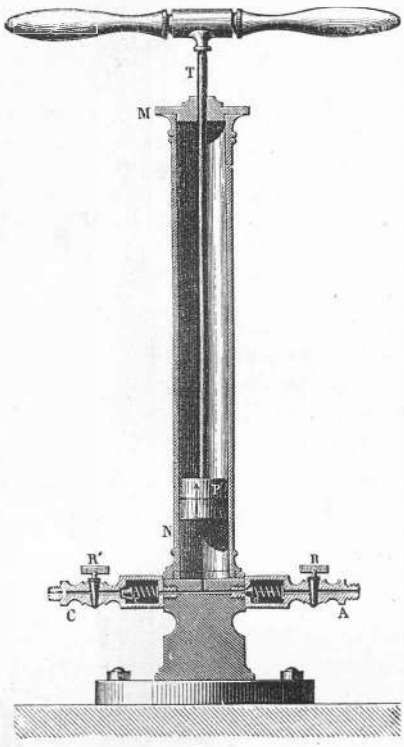


Fig. 155. — Pompe à main.

Elle se compose d'un corps de pompe MN (*fig.* 155) contenant un piston plein P, qu'on met en mouvement à l'aide d'une tige T munie d'une poignée. A la partie inférieure du corps de pompe sont deux tubes latéraux A, C, contenant chacun une soupape formée d'un petit tronc de cône métallique, qui pénètre dans une cavité pratiquée dans l'axe du tube ; un petit ressort spiral sert à maintenir chacun d'eux faiblement appliqué dans cette cavité. La figure montre que ces soupapes sont placées de façon à pouvoir s'ouvrir, l'une *a* sous l'action d'un excès de pression à l'intérieur du corps de pompe, l'autre *c* sous l'action d'un excès de pression à l'extérieur.

Si le tube C est mis en communication avec un récipient, il est aisé de voir que les mouvements alternatifs imprimés au piston produiront dans le récipient une raréfaction progressive, l'air s'échappant par A : la pompe fonctionne alors comme une machine pneumatique. Mais, l'appareil n'ayant qu'un seul corps de pompe, et l'effort nécessaire pour soulever le piston s'exerçant directement sur la tige, la manœuvre n'est possible, avec la force d'un homme, qu'à la condition de donner au piston une section beaucoup plus petite que dans la machine pneumatique. — L'espace nuisible ayant, par la construction même, une valeur assez grande, la pompe à main ne peut être employée que pour obtenir un degré de raréfaction peu éloigné.

comme une sorte de récipient intermédiaire, contenant de l'air raréfié jusqu'à la limite d'action de la machine, et dans lequel on aspire les gaz des appareils soumis à l'expérience.

173. Emploi de la pompe à main comme pompe de compression. — Pour employer la pompe à comprimer dans un récipient soit de l'air, soit un gaz quelconque, on met le tube A en communication avec ce récipient et l'on fait communiquer le tube C soit avec l'atmosphère, soit avec un réservoir à gaz. — Quand on soulève le piston, la soupape *c* s'ouvre, et laisse arriver l'air ou le gaz dans le corps de pompe; quand on fait descendre le piston, la soupape *a* s'ouvre dès que la force élastique intérieure surpasse celle qui s'exerce du côté A, et le gaz est refoulé dans le récipient.

174. Loi d'accroissement de la force élastique, dans la manœuvre de la pompe de compression. — Pour déterminer la loi suivant laquelle augmente la force élastique du gaz dans le récipient, nous supposerons d'abord la pompe parfaite, comme nous l'avons fait pour la machine pneumatique (165).

Soit H la force élastique, supposée invariable, dans l'espace où la pompe puise le gaz; H_0 la force élastique initiale dans le récipient où elle le comprime; V le volume du récipient, et *v* celui du corps de pompe. — Chaque fois que le piston s'élève, le volume *v* s'emplit de gaz à la pression H; quand il s'abaisse, ce gaz est refoulé dans le récipient et prend alors, sous le volume V, une force élastique $H\frac{v}{V}$, qui s'ajoute à la précédente (147). Donc, si l'on désigne par H_1, H_2..., H_n, les forces élastiques après 1, 2,...*n* coups de pistons, on aura :

$$H_1 = H_0 + H\frac{v}{V},$$

$$H_2 = H_0 + 2H\frac{v}{V},$$

. . . . . .

$$H_n = H_0 + nH\frac{v}{V}. \qquad (1)$$

Si l'on considère, en particulier, le cas plus simple où la pompe puise de l'air *dans l'atmosphère*, et le refoule dans un appareil contenant d'abord de l'air *à la pression atmosphérique*, on a $H_0 = H$; la force élastique, après *n* coups de piston, devient alors

$$H_n = H\left(1 + \frac{nv}{V}\right). \qquad (2)$$

L'une ou l'autre des formules (1) et (2) montre que la force élastique augmente toujours d'une quantité proportionnelle au nombre *n*; donc, *théoriquement*, et avec une pompe parfaite, la force élastique H_n pourrait devenir aussi grande qu'on voudrait, en donnant un nombre suffisamment grand de coups de piston.

Si maintenant on tient compte du volume u de l'espace nuisible, on trouve, en raisonnant comme précédemment (166), que la force élastique ne peut dépasser une limite déterminée, qui est ici $\Pi \frac{v}{u}$.

Enfin, dans la plupart des cas, les fuites qui se produisent dans l'appareil à mesure que l'opération se poursuit, et qui arrivent à laisser échapper une quantité de gaz égale à celle que la pompe refoule, font que la pression cesse de s'accroître avant d'atteindre des valeurs voisines de cette limite. Il faut alors cesser de faire fonctionner la pompe, et fermer le récipient.

175. Expériences fondées sur la raréfaction ou la compression des gaz. — La machine pneumatique est d'un usage continuel dans les laboratoires : nous avons indiqué déjà, à diverses occasions, quelques-unes des expériences qu'elle permet de réaliser. — Citons encore l'expérience suivante :

Fig. 156.
Jet d'eau dans le vide.

On emplit d'eau à moitié un petit flacon, et l'on introduit dans le col un bouchon, traversé par un tube de verre qui est effilé à sa partie supérieure et qui plonge dans l'eau par son autre extrémité. On place le flacon sur la platine, on le couvre d'une cloche (*fig.* 156), et l'on raréfie l'air dans la cloche. La force élastique de l'air qui est enfermé dans le flacon fait monter l'eau dans le tube, et l'on voit le liquide jaillir par l'extrémité effilée : c'est l'expérience connue sous le nom de *jet d'eau dans le vide.*

Fig. 157. — Fontaine de compression.

Voici une expérience analogue, que l'on réalise en employant la pompe à main comme *pompe de compression.* — On prend un réservoir métallique (*fig.* 153), dans l'axe duquel est assujetti un tube pénétrant presque jusqu'au fond, et muni d'un robinet à son extrémité supérieure. On introduit d'abord de l'eau dans l'appareil (à peu près jusqu'au trait ponctué) ; puis, au moyen d'une pompe à main, on refoule de l'air par le tube central : le gaz comprimé vient s'accumuler dans l'espace qui surmonte la surface du liquide. On ferme le robinet, on enlève la pompe, et l'on adapte sur le tube un ajutage étroit. Si l'on ouvre alors le robinet, on voit l'eau jaillir à une grande hauteur, en raison de l'excès de

la pression intérieure sur la pression atmosphérique. — Cet appareil est connu sous le nom de *fontaine de compression*.

176. Applications industrielles. — La raréfaction ou la compression des gaz donnent lieu, dans l'industrie, à de nombreuses applications.

Le *télégraphe pneumatique*, qui sert à l'envoi de dépêches manuscrites dans les divers quartiers d'une ville, se compose d'une série de tubes souterrains, se rendant d'une station à une autre : une sorte de piston creux, contenant les dépêches dans son intérieur, est introduit dans le tube, à la station du départ : on le fait parvenir à la station suivante, en injectant dans le tube de l'air comprimé.

Les *cloches à plongeur*, dans lesquelles se placent les ouvriers pour les travaux à effectuer sous l'eau, sont de grands cylindres métalliques, ouverts par leur partie inférieure, et dans lesquels des pompes de compression, placées sur le rivage, refoulent continuellement de l'air; de cette façon, l'eau ne peut pas pénétrer dans la cloche, et l'air se renouvelle sans cesse, en s'échappant par le pourtour de la cloche.

Les *freins* que l'on emploie sur la plupart des lignes de chemins de fer, pour arrêter les trains, sont commandés par des pistons, placés dans des cylindres installés sous chaque wagon. Une petite machine à vapeur, installée sur la locomotive, sert à entretenir une provision d'air comprimé, dans un réservoir à parois très résistantes. Il suffit de faire arriver cet air dans les cylindres, sur l'une des faces des pistons, pour que tous les freins entrent en jeu à la fois. — Dans d'autres systèmes (freins *à vide*), on fait communiquer les cylindres avec un réservoir vide d'air : c'est alors la pression atmosphérique qui met en mouvement les pistons des freins.

II. — POMPES A LIQUIDES

177. Diverses espèces de pompes à liquides. — Longtemps avant d'être appliquées à la raréfaction ou à la compression des gaz, les pompes avaient été employées à élever l'eau.

Les pompes à eau peuvent, aujourd'hui encore, être rapportées à trois types principaux : la *pompe aspirante*, la *pompe foulante*, et la *pompe aspirante et foulante*.

178. Pompe aspirante. — La pompe aspirante (*fig.* 138) se compose d'un *corps de pompe* CC', dans lequel se meut un piston P, et qui présente, à sa partie inférieure, un *tuyau d'aspiration* T plongeant dans le puisard *mn* dont on veut élever l'eau; à sa partie supérieure, se trouve un tuyau de déversement D. A la jonction du corps de pompe et du tuyau d'aspiration, est une soupape ou *clapet* S, qui consiste en une plaque métallique, garnie de cuir en dessous et mobile autour d'une charnière. Le piston est traversé, parallèlement à son axe, par deux ouvertures munies de clapet *s*, *s'* (*fig.* 139); il est garni d'étoupes sur

son contour. La tige du piston s'articule avec un levier, au moyen duquel on lui imprime les mouvements d'ascension et de descente.

Supposons que, la pompe n'ayant pas encore fonctionné, on soulève pour la première fois le piston. Ce mouvement tendant à produire une raréfaction de l'air au-dessous du piston, la soupape S se soulève : elle laisse passer une partie de l'air qui était dans le tuyau d'aspiration, et qui acquiert ainsi une pression moindre que la pression atmosphérique ; par suite, l'eau du puisard s'élève dans le tuyau T, jusqu'à ce que la pression de la colonne d'eau, augmentée de la force élastique de l'air intérieur, produise une pression totale égale à la pression atmosphérique qui s'exerce extérieurement sur *mn*. — Supposons que l'eau n'atteigne pas encore le point S, au moment où le piston arrive au haut de sa course : l'équilibre de force élastique étant établi au-dessus et au-dessous du clapet S, ce clapet retombe par son propre poids. Quand le piston redescend, il comprime l'air contenu dans le corps de pompe ; il lui fait bientôt acquérir une force élastique suffisante pour que les soupapes *s* et *s'* se soulèvent, et laissent échapper cet air au dehors. — Quand le piston est soulevé de nouveau, l'eau s'élève un peu plus encore dans le tuyau d'aspiration, et ainsi de suite, jusqu'au moment où l'eau franchit la soupape S : la pompe est alors *amorcée*. Ce résultat pourra toujours être obtenu, à la condition que le tuyau d'aspiration n'ait pas une hauteur supérieure à 10 mètres environ, au-dessus du niveau *mn* (*).

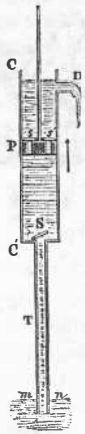


Fig. 158. Pompe aspirante.

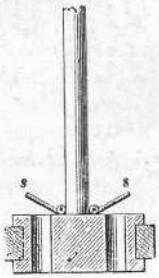


Fig. 159.

La pompe une fois amorcée, on continue à faire fonctionner le piston. Chaque fois qu'il descend, l'eau enfermée dans le corps de pompe franchit les soupapes *s s'*. Chaque fois qu'il remonte, il soulève l'eau que supporte sa face supérieure, et la fait écouler par le tuyau de déversement D ; en même temps, il fait pénétrer une nouvelle quantité d'eau du puisard dans le tuyau d'aspiration et dans le corps de pompe.

179. Effort à développer pour mettre la pompe en mouvement. — Quand le piston descend, les clapets *s* et *s'* étant ouverts, il y a communication entre le liquide qui est au-dessus de lui et celui qui est au-dessous, dans le corps de pompe ; les pressions que supportent ses deux faces sont donc sensiblement égales. L'effort qu'il faut exer-

(*) Dans la pratique, l'eau ne peut même pas atteindre cette hauteur, à cause des rentrées d'air qui se produisent entre le piston et le corps de pompe, et aussi à cause de l'espace nuisible. C'est pourquoi on ne donne guère aux tuyaux d'aspiration plus de 7 à 8 mètres de haut.

cer, pour faire *descendre* le piston, est donc seulement employé à vaincre les frottements.

Voyons maintenant quel est l'effort à développer pour faire *monter* le piston. — Représentons par H la pression atmosphérique, évaluée *en colonne d'eau*; soit, à un moment quelconque, h la hauteur du piston au-dessus du niveau de l'eau *mn*, et h' la hauteur de l'eau au-dessus du piston, jusqu'au tuyau de déversement D. — La pression que le piston supporte de haut en bas, sur sa face supérieure, est égale au poids d'une colonne d'eau dont la hauteur serait $H + h'$; la pression qu'il supporte de bas en haut, sur sa face inférieure, est égale au poids d'une colonne d'eau dont la hauteur serait $H - h$. La résultante de ces deux pressions, dirigée de haut en bas, est donc le poids d'une colonne d'eau ayant pour base le piston et pour hauteur $h + h'$, c'est-à-dire la distance verticale du tuyau de déversement au niveau de l'eau dans le puisard. — On voit donc que l'effort à développer pour soulever le piston est, en général, une force assez considérable : il est donc avantageux de l'exercer par l'intermédiaire d'un levier (*).

180. Travail, par coup de piston. — Soit s la surface du piston, exprimée en centimètres carrés, et h la distance du tuyau de déversement au niveau du puisard, exprimée en centimètres. Pour soulever le piston d'un mouvement uniforme, la force nécessaire est égale (179) au poids d'une colonne d'eau dont le volume en centimètres cubes serait sh; c'est donc une force de shg dynes. Si maintenant on désigne par l la longueur du corps de pompe en centimètres, le travail, en ergs, pour chaque coup de piston, est égal à $shg \times l$.

Si l'on remarque que slg est le poids de l'eau élevée par coup de piston, et que h est la hauteur à laquelle cette masse a été élevée, on voit que le produit $slg \times h$ est l'accroissement de son énergie potentielle (32). — Le travail $shg \times l$ dépensé par coup de piston est donc égal à l'accroissement d'énergie potentielle $slg \times h$ de la masse d'eau soulevée.

Fig. 140.
Pompe foulante.

181. Pompe foulante. — La pompe foulante (*fig.* 140) se compose d'un corps de pompe CC' entièrement immergé dans l'eau du puisard *mn*, d'un piston P, et d'un *tuyau de refoulement* R qui prend naissance à la partie inférieure du corps de pompe. A la base du corps de pompe, est une ouverture, avec un clapet S qui s'ouvre de dehors en dedans; à la jonction du corps de pompe et du tuyau de refoulement, est une seconde soupape s qui s'ouvre de dedans en dehors.

(*) Dans la pompe aspirante, le levier est du *premier genre*, c'est-à-dire que le point fixe est placé entre le point d'application de la résistance à vaincre et le point sur lequel s'exerce l'effort du bras qui le manœuvre. Par suite, l'effort à développer,

Quand on soulève le piston, l'eau pénètre dans le cylindre, en franchissant la soupape S, pour remplir le vide qui tendrait à se former dans le corps de pompe. Quand on fait descendre le piston, la soupape S se ferme : la pression qu'on exerce sur l'eau ouvre la soupape *s*, et chasse l'eau du corps de pompe dans le tuyau de refoulement. — Dès que le liquide a atteint l'extrémité supérieure du tuyau de refoulement, la pompe débite, à chaque coup de piston, un volume d'eau égal à la capacité du corps de pompe. Mais l'écoulement du liquide se produit *pendant la descente du piston* : c'est le contraire de ce qui avait lieu dans la pompe aspirante.

182. Effort à développer. — On verra, en raisonnant comme dans le cas précédent : 1° que l'effort à développer pour faire *monter* le piston est nul, si l'on néglige les frottements; 2° que, pour le faire *descendre*, il faut lui appliquer une force au moins égale au poids d'une colonne d'eau ayant pour base le piston, et pour hauteur la distance verticale de l'orifice d'écoulement au niveau de l'eau dans le puisard (*).

Mais les deux systèmes de pompes que nous venons d'étudier présentent cette différence essentielle, que la pompe aspirante ne peut élever l'eau que jusqu'à une hauteur limitée (178), tandis que la pompe foulante, théoriquement du moins, peut l'élever à une hauteur quelconque, pourvu qu'on applique au piston une force suffisante. — Dans la pratique, il y a toujours, pour chaque pompe, une limite de hauteur, qui dépend de la résistance des parois et de l'ajustement plus ou moins parfait de ses pièces mobiles.

183. Travail, par coup de piston. — On démontrerait, comme pour la pompe aspirante (180), et en adoptant les mêmes notations, que le travail par coup de piston est exprimé par le produit $shg \times l$.

L'accroissement d'énergie potentielle de la masse d'eau élevée est représenté par le produit $slg \times h$; il est égal au travail dépensé.

184. Pompe à incendie. — La pompe à incendie (*fig.* 141) n'est autre chose qu'un système de deux corps de pompes accouplés, et placés dans une bâche remplie d'eau. Les pistons *a*, *a*, sont mis en mouvement au moyen d'un levier ●O, mobile autour d'un axe horizontal qui passe par son milieu : tandis que l'un des pistons s'élève, l'autre s'abaisse, et inversement. Au lieu de faire pénétrer l'eau directement dans le tuyau de refoulement, ils la font passer dans un réservoir *e* qui contient de l'air; le tuyau de refoulement *dd* prend naissance vers

pour faire monter le piston, se produit *en appuyant* sur l'extrémité du levier, ce qui est, en raison de la conformation de nos organes, la disposition la moins fatigante.

(*) Dans la pompe foulante, le levier est du *second genre*, c'est-à-dire que le point fixe est à l'une des extrémités du levier; l'effort s'exerce à l'autre extrémité, et la résistance est appliquée entre ces deux points. C'est donc encore *en appuyant* sur le levier qu'on triomphe de la résistance.

la partie inférieure de ce réservoir. C'est alors la force élastique de l'air comprimé dans le réservoir *e* qui fait monter l'eau dans le tuyau

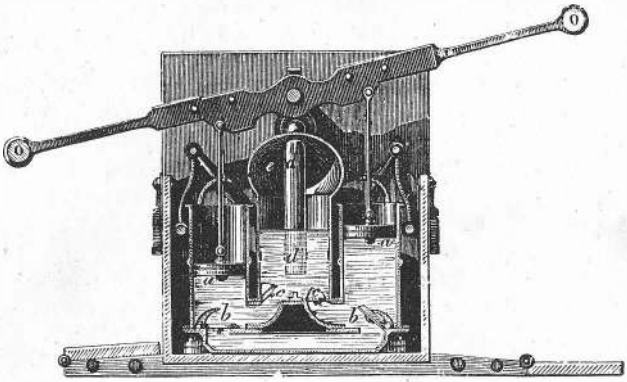


Fig. 141. — Pompe à incendie.

de refoulement. On obtient ainsi un jet *sensiblement régulier*, par le tube de cuivre ou *lance*, qui termine ce tuyau.

185. Pompe aspirante et foulante. — La pompe *aspirante et foulante* (*fig.* 142) est une combinaison de la pompe aspirante et de la pompe foulante. Elle se compose d'un tuyau d'aspiration T, d'un corps de pompe muni d'un piston plein P, et d'un tuyau de refoulement R, qui prend naissance à la base du corps de pompe. — Quand le piston monte, l'eau arrive par aspiration dans le corps de pompe; quand le piston descend, l'eau est refoulée dans le tuyau R. Le jeu des soupapes se comprend immédiatement, d'après ce qui a été dit dans les cas précédents.

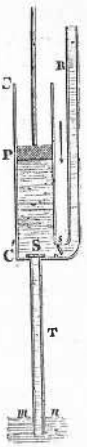


Fig. 142. Pompe aspirante et foulante.

Nous ferons remarquer enfin que, pour peu que le tuyau du refoulement R présente une assez grande hauteur, l'eau exerce, sur la face inférieure du piston, une pression qui tend à chasser le liquide entre le piston et la paroi du corps de pompe. — On parvient à réaliser une fermeture plus exacte au moyen d'un *piston plongeur* (*fig.* 143) : c'est un cylindre métallique P, dont la hauteur est à peu près égale à celle du corps de pompe; il ne touche pas la paroi du cylindre, mais il traverse une garniture d'étoupes E, installée à demeure à la partie supérieure du corps de pompe. Le piston prend ainsi, en descendant, la place de l'eau qu'il chasse dans le tuyau de refoulement.

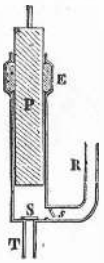


Fig. 143. Piston plongeur.

186. Pompe aspirante et élévatoire. — On modifie quelquefois la construction de la pompe *aspirante*, de manière à la rendre capable d'élever l'eau à une hauteur plus ou moins grande dans un *tuyau d'ascension* E (*fig.* 144). On ferme alors le corps de pompe à sa partie supérieure, et l'on fait passer la tige du piston dans une garniture d'étoupes fixe. A chaque ascension, en même temps que le piston aspire l'eau du puisard, il élève dans le tuyau E l'eau qui est au-dessus de lui. Lorsque le piston redescend, le clapet S se ferme, et le liquide traverse les orifices des clapets *s* et *s'*, tandis que son niveau demeure immobile dans le tuyau d'ascension. — Cette disposition a reçu le nom de pompe *aspirante et élévatoire*.

Fig. 144. Pompe aspirante et élévatoire.

On reconnaîtra facilement que, dans cette pompe, l'effort à développer, pour élever l'eau jusqu'au sommet du tuyau d'ascension, est égal au poids d'une colonne liquide ayant pour base le piston et pour hauteur la distance verticale de l'orifice d'écoulement au niveau de l'eau dans le puisard.

187. Presse hydraulique. — Nous retrouvons la pompe aspirante et foulante dans la presse hydraulique, dont nous n'avons indiqué jusqu'ici que le principe (71).

Une petite pompe F (*fig.* 145), à piston plongeur, puise l'eau dans un réservoir placé au-dessous, et la refoule dans un gros cylindre qui contient aussi un piston plongeur, surmonté d'un plateau C; au-dessus de ce plateau, est une plate-forme D, reliée au cylindre par des colonnes de fonte E, E. Les objets qu'on veut soumettre à l'action de la presse sont placés entre C et D. — Chaque fois que le piston de la

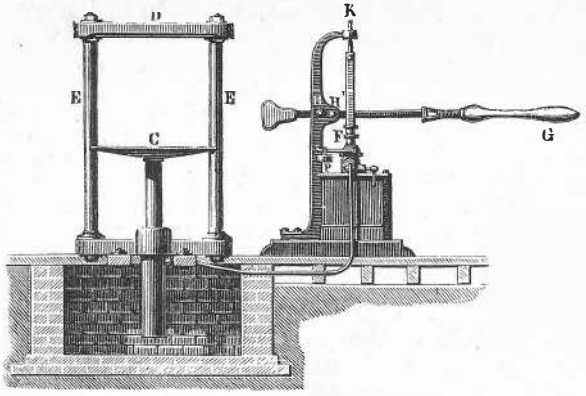


Fig. 145. — Presse hydraulique.

petite pompe descend, l'eau qui est refoulée dans le gros cylindre fait

monter le gros piston d'une petite quantité, en sorte que les corps placés entre C et D éprouvent une compression progressive. — Un homme, en appuyant sur l'extrémité du levier GH', produit sur la surface du petit piston une pression qui est égale à sa propre force multipliée par le rapport du grand bras de levier au petit : la force qui agit sur les corps comprimés s'obtient en multipliant encore cette expression par le rapport de la section du gros piston à la section du petit. On arrive ainsi à vaincre des résistances considérables (*).

Une modification récente, due à M. Desgoffe, permet d'atteindre des pressions bien plus considérables encore qu'avec les anciens appareils. Cette modification consiste dans l'addition, à la base du gros corps de pompe, d'un cylindre d'acier A (*fig.* 146), que l'on peut y faire péné-

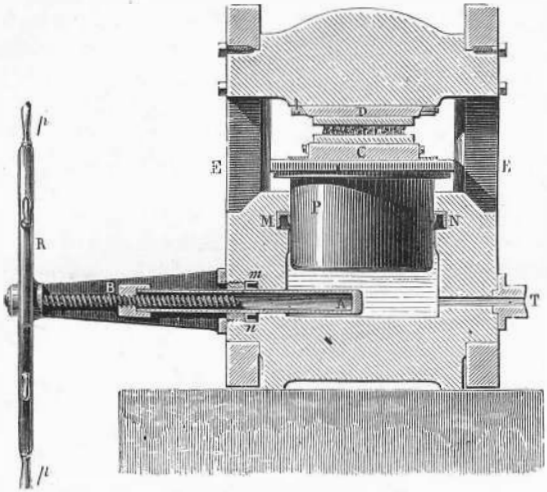


Fig. 146. — Presse hydraulique.

trer au moyen d'une vis; cette vis elle-même est mise en mouvement par la roue R, que l'on manœuvre à l'aide de poignées p,p. Le cylindre A est creux, et porte un écrou B dans lequel s'engage le pas de la vis. — Tant qu'on fait fonctionner la petite pompe, qui refoule l'eau dans le gros corps de pompe par le tuyau T, on laisse le cylindre A dans une position telle qu'il pénètre à peine dans ce corps de pompe.

(*) L'avantage de cette machine est de permettre de vaincre, avec une force motrice relativement petite, une résistance considérable; mais, comme dans toutes les machines qu'on étudie en Mécanique, ce qu'on gagne en *force*, on le dépense en *chemin parcouru*. En effet, si la section du gros piston est égale à 100 fois celle du petit, la hauteur dont s'élève le gros piston, pour chaque mouvement de descente du petit, est 100 fois moindre; le *travail résistant* est donc égal au *travail moteur*.

Lorsque la pression a acquis une valeur telle que la pompe foulante ne puisse plus fonctionner, on manœuvre la vis V de façon à faire pénétrer le cylindre A autant que possible : le piston P continue encore à s'élever, et l'on parvient ainsi à exercer, entre les plateaux C et D, des pressions beaucoup plus grandes.

Sous ces pressions énormes, il est difficile d'empêcher l'eau de filtrer entre le piston et la paroi du corps de pompe, et cependant il est indispensable de réaliser une fermeture hermétique, sans augmenter les frottements outre mesure. On y parvient à l'aide d'une disposition due à l'ingénieur anglais Bramah. — Une gorge circulaire MN, creusée dans l'épaisseur du corps de pompe, contient une garniture de cuir, dont une moitié est représentée à part dans la figure 147. C'est une plaque de cuir, en forme d'anneau, dont le bord extérieur et le bord intérieur ont été *emboutis*, c'est-à-dire repoussés au marteau, de manière à lui donner la forme d'une sorte de rigole renversée. L'eau qui presse dans la concavité de cette rigole applique son bord interne contre le piston, son bord externe contre la paroi du corps de pompe, et la fermeture est d'autant plus parfaite que la pression est plus considérable

Fig. 147. — Cuir embouti.

La presse hydraulique reçoit de nombreuses applications dans l'industrie. Elle est employée pour extraire les huiles de diverses graines ; pour exprimer le suc de la betterave; on l'emploie également dans la fabrication des bougies, du papier, du vermicelle, etc.

III — SIPHON. — VASE DE MARIOTTE

188. Siphon. — Le siphon est un tube formé de deux branches d'inégales longueurs, et destiné au transvasement des liquides.

Pour qu'un siphon puisse fonctionner, il faut d'abord qu'il soit *amorcé*, c'est-à-dire que le tube ABB'A' (*fig.* 148), plongeant par ses extrémités dans deux vases MN, M'N' remplis d'un même liquide, soit lui-même rempli de ce liquide. — Admettons, pour un instant, qu'il existe en *mn* une cloison solide fixée aux parois du tube, à une distance z de MN, à une distance z' de M'N'. On pourra assimiler les deux branches du siphon à deux éprouvettes A*mn*, A'B'B*mn*, remplies du même liquide, et retournées sur deux cuvettes V et V'. Pour que le liquide reste suspendu dans les éprouvettes, il faut que les distances verticales z et z' soient, l'une et l'autre, moindres que la hauteur H du liquide qui ferait équilibre à la pression atmosphérique. S'il en était autrement, le liquide descendrait dans les deux branches et resterait suspendu dans chaque branche à une hauteur H au-dessus du niveau de la cuvette. — Or les plus grandes valeurs de z et de z' sont h et h', distances verti-

cales des deux surfaces libres MN et M'N' au point le plus élevé du tube. Pour que le siphon *reste amorcé*, il faut donc que les hauteurs verticales

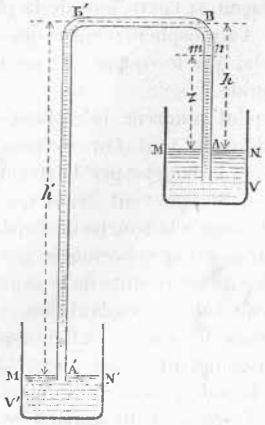


Fig. 148.

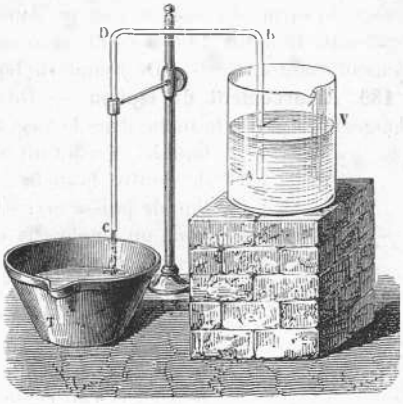


Fig. 149. — Siphon.

des deux branches soient plus petites que la hauteur H de la colonne du liquide à transvaser, qui ferait équilibre à la pression atmosphérique (*).

Cette condition étant supposée remplie, la pression que supporte la cloison *mn* de bas en haut, eu égard à la pression atmosphérique qui s'exerce en MN, sera exprimée par $H - z$. La pression que supporte la cloison de haut en bas est plus petite; eu égard à la pression atmosphérique qui s'exerce en M'N', elle est exprimée par $H - z'$. La différence de ces pressions est $z' - z$, ou $h' - h$.

Les valeurs de ces pressions ne sont pas modifiées, si la cloison n'est pas adhérente aux parois du tube; la cloison est donc sollicitée à se mouvoir, de A en A', par une force proportionnelle à la différence des niveaux dans les deux vases V et V'. Ce résultat étant indépendant de la valeur de z, toutes les tranches sont sollicitées à se mouvoir dans le même sens, par des pressions dont la valeur est la même. Donc l'équilibre ne peut exister; l'expérience montre, en effet, que le liquide se met en mouvement du niveau le plus haut A vers le niveau le plus bas A'.

Si on laisse l'expérience se continuer, la vitesse d'écoulement dimi-

(*) Dans le cas où l'on aurait $h < H$, et $h' > H$, le siphon ne resterait pas amorcé; le liquide descendrait dans la longue branche, à une hauteur H au-dessus du niveau M'N', laissant ainsi, à la partie supérieure de A'B' un vide barométrique; puis le liquide s'écoulerait de B' dans la longue branche, à travers le vide barométrique; la vitesse d'écoulement serait la même que si la hauteur de la grande branche était exactement H.

nue, à mesure que la différence des niveaux dans les deux vases diminue d'elle-même.

Le liquide s'écoule encore de la même façon, si l'extrémité de la plus grande branche du siphon s'ouvre dans l'atmosphère, ainsi que le représente la figure 149. Il suffit, pour cela, que le siphon soit préalablement *amorcé*, c'est-à-dire rempli de liquide.

189. Amorcement du siphon. — On peut amorcer le siphon, en plongeant la petite branche dans le vase dont on veut faire écouler le liquide, et aspirant avec la bouche par l'extrémité de l'autre branche. — Si l'on veut éviter que le liquide puisse arriver jusqu'à la bouche de l'opérateur, on emploie la disposition représentée par la figure 150. Au voisinage de l'extrémité de la grande branche, est soudé un tube ascendant *am* : on plonge l'extrémité A dans le liquide, et l'on aspire par l'ouverture *m*, en bouchant avec le doigt l'extrémité C. Dès que le liquide arrive en *a*, on retire le doigt et l'on cesse d'aspirer. Tout se passe alors comme si la branche BC se terminait en *a*, puisque la pression de l'atmosphère s'exerce en ce point par le tube *ma*.

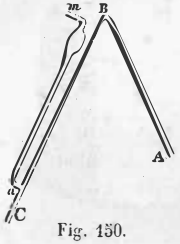


Fig. 150.

La disposition suivante peut encore être employée. Un siphon ABC (*fig.* 151) passe au travers d'un bouchon, qui ferme hermétiquement le vase contenant le liquide. Un tube T pénètre également au travers du bouchon et vient s'ouvrir à la partie supérieure du vase. — On comprime avec la bouche, par le tube T, l'air qui presse sur la surface libre MN, jusqu'à ce que le liquide, s'élevant dans la petite branche du siphon, descende ensuite dans la grande branche jusqu'au-dessous du plan horizontal mené par MN : on peut alors retirer la bouche, et l'écoulement continue sous l'action de la pression atmosphérique. — Pour arrêter l'écoulement, il suffit d'aspirer par le tube T jusqu'à ce que le liquide remonte, dans la grande branche, au-dessus du plan horizontal mené par MN. — Cette disposition permet donc de produire ou d'arrêter à volonté l'écoulement, en laissant le siphon installé jusqu'à ce que le vase soit vide.

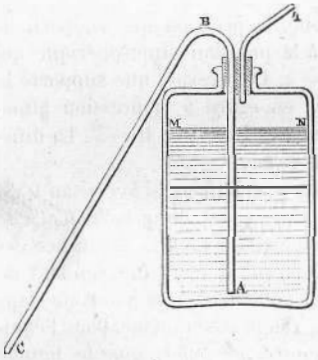


Fig. 151.

190. Vase de Tantale. — Le siphon permet d'obtenir un écoulement intermittent, en employant la disposition connue sous le nom de *vase de Tantale*. — Un vase (*fig.* 152), percé d'une ouverture à sa

partie inférieure, contient un siphon, dont la grande branche est assujettie dans un bouchon qui ferme cette ouverture. Lorsqu'on verse de l'eau dans le vase, elle pénètre successivement dans la branche de droite, où son niveau est d'abord dans le même plan horizontal qu'à l'extérieur; puis, au moment où le niveau dans le vase atteint le sommet C de la courbure, l'eau passe dans la branche de gauche, qu'elle remplit dans toute sa longueur : l'écoulement continue, jusqu'à ce que le niveau MN de l'eau se soit abaissé au-dessous de l'extrémité de la petite branche. — Si le vase est alimenté, à sa partie supérieure, par un robinet ayant un débit continu, mais moindre que celui du siphon, on obtiendra un écoulement intermittent et périodique, le vase ne se remplissant jamais plus haut que la courbure C du siphon.

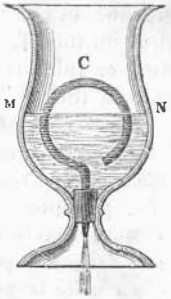


Fig. 152.
Vase de Tantale.

191. Vase de Mariotte. — En général, quand un liquide s'écoule par une ouverture pratiquée dans un vase, la vitesse d'écoulement diminue d'une manière progressive, parce que la pression du liquide, au niveau de l'ouverture, va en diminuant avec la hauteur de sa surface libre au-dessus de ce point. — On donne le nom de *vase de Mariotte*, à une disposition qui est destinée à rendre la vitesse d'écoulement constante.

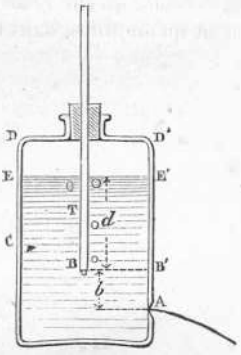


Fig. 153. — Vase de Mariotte.

Soit un flacon C (*fig.* 153), percé vers sa partie inférieure d'une ouverture A assez petite pour ne laisser passage qu'à un mince filet de liquide : le col du flacon est fermé par un bouchon, traversé par un tube T dont l'extrémité inférieure B est à une certaine distance verticale b au-dessus de l'ouverture A. Supposons que, l'ouverture A étant fermée, on ait rempli le vase d'eau, jusqu'à une hauteur d au-dessus de l'extrémité B du tube, de manière à ne laisser à la partie supérieure qu'une petite quantité d'air.

Considérons d'abord ce qui se passe au moment où l'on débouche l'orifice A. Si l'on représente par H la pression atmosphérique évaluée *en colonne d'eau*, on voit que, au point A, la pression extérieure est H; la pression intérieure est représentée par la somme de la force élastique de l'air intérieur et de la pression du liquide au-dessus de A : cette somme est $H + d + b$. Dès lors, à ce moment, l'eau s'écoule par l'orifice, sous une pression représentée par une colonne d'eau de

hauteur $d + b$. — Mais, dès que cet écoulement se produit, le volume de l'air enfermé dans le flacon augmente; par suite, sa force élastique diminue, et l'on voit le niveau de l'eau s'abaisser rapidement à l'intérieur du tube T, sous l'action de la pression atmosphérique qui s'exerce dans ce tube. Il arrive, très promptement, que le niveau du liquide dans le tube descend jusqu'à l'extrémité inférieure B, et alors l'air extérieur commence à pénétrer par cette extrémité, sous forme de bulles qui se rendent à la partie supérieure du flacon. — *A partir de ce moment, la vitesse d'écoulement par l'orifice* A *devient constante.* En effet, quel que soit l'abaissement progressif de la surface libre EE′, la pression exercée sur les divers points du plan horizontal BB′ reste toujours égale à la pression atmosphérique H, qui s'exerce directement en B; par suite la pression intérieure, au niveau de l'orifice A, est toujours représentée par $H + b$. En d'autres termes, la pression qui détermine l'écoulement est toujours représentée par une colonne d'eau de hauteur b.

Il en est ainsi tant que le niveau EE′ de la surface libre dans le flacon n'est pas descendu au-dessous de l'extrémité B du tube; et en effet, si l'on observe la distance à laquelle arrive le jet sur un plan horizontal, on constate qu'elle reste constante. — C'est cette période de l'écoulement qu'on utilise dans les applications.

LIVRE DEUXIÈME

CHALEUR

CHAPITRE PREMIER

DILATATIONS

I. — DILATATION DES CORPS PAR LA CHALEUR.

192. Accroissement de longueur des tiges solides sous l'action de la chaleur. — Tous les corps, sauf quelques rares exceptions, éprouvent, quand on les chauffe, un accroissement dans leurs diverses dimensions. C'est le phénomène désigné sous le nom de *dilatation*.

Le *pyromètre à levier* (*fig.* 154) permet d'apprécier les variations progressives de longueur qu'éprouve une tige métallique, lorsqu'on la

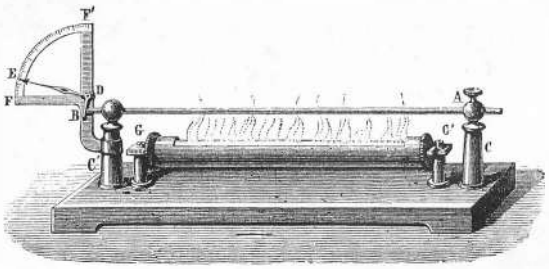


Fig. 154. — Pyromètre à levier.

chauffe. — Une tige métallique AB traverse deux colonnes C et C′ ; elle est fixée en A au moyen d'une vis, passe librement dans la colonne C′, et vient appuyer en B contre la petite branche d'un levier coudé BDE, mobile autour du point D. La grande branche DE de ce levier a la forme d'une aiguille, dont l'extrémité peut parcourir un cadran divisé FF′. — Quand on chauffe la tige, en enflammant de l'alcool placé dans le réservoir GG′, la tige s'allonge : comme son extrémité A est fixe, l'autre extrémité se déplace et pousse la branche DB du levier, en la faisant

tourner autour du point D. Si DE est, par exemple, égal à dix fois DB, l'arc décrit par l'extrémité E a une longueur égale à dix fois celle de l'arc décrit par l'extrémité B de la petite branche, lequel se confond sensiblement avec le déplacement de l'extrémité de la tige. — Si on laisse refroidir la tige, l'aiguille DE revient à sa position primitive.

193. Accroissement de volume des corps solides sous l'action de la chaleur. — *L'anneau de S'Gravesande* permet de constater l'augmentation de volume des corps solides qu'on échauffe. A froid, la sphère de cuivre S (*fig.* 155) passe exactement à travers l'anneau de cuivre C; lorsqu'on chauffe la sphère seule, on constate qu'elle ne traverse plus l'anneau. Quand on la laisse refroidir, ses dimensions redeviennent ce qu'elles étaient avant l'expérience. — Si l'on chauffe en même temps la sphère et l'anneau, on constate que les dimensions intérieures de l'anneau restent égales aux dimensions extérieures de la sphère. — De ces observations, on peut tirer les conclusions suivantes :

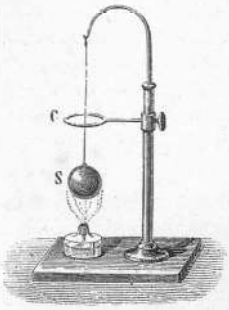


Fig. 155.
Anneau de S'Gravesande.

1° *Le volume des corps solides qu'on échauffe s'accroît dans tous les sens;*

2° *La capacité des espaces vides que ces corps présentent s'accroît d'une quantité égale à l'accroissement de volume d'un corps solide, de même nature, qui remplirait exactement cette capacité.*

Cette dernière remarque fait concevoir, par exemple, que la capacité intérieure d'un vase de verre doit augmenter, sous l'action de la chaleur, comme le volume d'une masse *du même verre* qui remplirait le vase. — C'est, en effet, ce que des expériences précises ont vérifié d'une manière rigoureuse.

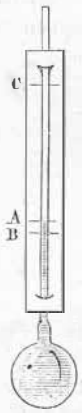


Fig. 156.
Dilatation des liquides.

194. Accroissement de volume des liquides sous l'action de la chaleur. — Pour constater l'accroissement de volume des corps liquides sous l'action de la chaleur, prenons un ballon de verre (*fig.* 156), surmonté d'un tube étroit, et contenant de l'eau colorée jusque vers le milieu du tube. Marquons ce niveau sur une feuille de papier fixée au tube, et plongeons le ballon dans l'eau chaude. — On voit, au premier moment, le niveau du liquide s'abaisser un peu dans le tube : c'est l'effet produit par l'échauffement du verre, qui augmente la capacité intérieure du ballon (193). Mais, aussitôt après, la chaleur se transmettant au liquide intérieur, on voit le niveau remonter et dépasser de beaucoup le point d'où il était parti. Cette observation montre que le volume du liquide augmente plus que celui du verre.

195. Accroissement du volume ou de la force élastique des gaz sous l'action de la chaleur. — Prenons enfin un ballon de verre B (*fig.* 157), soudé à un tube recourbé horizontalement, et ne contenant que de l'air; pour séparer cet air de l'air extérieur, introduisons dans le tube une petite colonne de liquide *a*. Il suffira d'échauffer légèrement le ballon, en y appliquant la main, pour voir la colonne liquide se mettre en mouvement vers l'extrémité du tube. — Les gaz sont donc encore plus dilatables par la chaleur que les liquides.

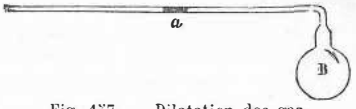


Fig. 157. — Dilatation des gaz.

Remarquons maintenant que, dans cette expérience, la force élastique de l'air intérieur, qui presse sur la colonne liquide d'un côté, reste toujours égale à la pression de l'atmosphère, qui presse sur elle de l'autre côté. Au contraire, quand le volume d'un gaz est maintenu sensiblement constant, l'échauffement produit un *accroissement de force élastique*. — C'est ce qu'on peut constater par l'expérience suivante. Le ballon de verre B (*fig.* 158) contient de l'air : le tube recourbé et la petite boule dont il est muni contiennent du mercure ou de l'eau colorée. Quand on approche la main du ballon, on voit le liquide monter dans la branche ouverte du tube, jusqu'à un certain niveau D, au-dessus du niveau *cc'* dans la boule. Par cette disposition, le volume de l'air intérieur varie donc très peu, mais sa force élastique augmente, car elle arrive à faire équilibre, non seulement à la pression atmosphérique qui s'exerce en D, mais encore à la pression produite par la colonne de liquide *c'*D.

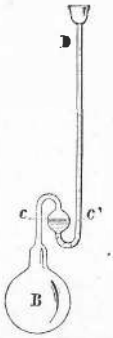


Fig. 158. Accroissement de force élastique des gaz.

II. — THERMOMÈTRES.

196. Températures. — Thermomètres. — Le sens du toucher permet, dans certains cas, de décider si un corps est plus chaud qu'un autre, ou si un même corps est, à un instant déterminé, plus chaud qu'à un autre instant. Mais les impressions de chaud ou de froid que nous percevons au contact dépendent, en général, de la disposition dans laquelle se trouvent nos organes : par suite, ces impressions nous exposent à des erreurs. Enfin, il est des circonstances où l'on ne peut employer le toucher comme moyen d'investigation.

Les phénomènes du genre de ceux qui viennent d'être étudiés fournissent des moyens de comparaison plus sûrs et plus généraux. En particulier, un appareil comme celui de la figure 156 étant plongé dans un milieu quelconque, et le niveau du liquide dans le tube étant arrivé

une position fixe, on dira que *la température de ce milieu est plus ou moins élevée*, suivant que le niveau du liquide *sera lui-même plus ou moins élevé*. — En général, on désigne sous le nom de *thermomètres*, des instruments destinés à donner des indications précises sur la température des corps avec lesquels on les met en contact.

L'emploi de ces instruments permet, comme on va le voir, de caractériser par des nombres les diverses températures.

197. Points fixes. — Un instrument semblable à celui de la figure 156, et contenant par exemple du mercure, étant placé dans de la glace en fusion, l'expérience montre que le niveau du liquide dans le tube arrive toujours *à une même position fixe*, qu'il conserve tant que la fusion de la glace n'est pas terminée.

Le même appareil étant placé dans un vase ouvert, à une petite distance d'une masse d'eau portée à l'ébullition, de manière qu'il soit environné de vapeur, on constate de même que, si la pression atmosphérique est de 76 centimètres, le niveau du mercure dans le tube arrive toujours à *un même point* (plus élevé que dans l'expérience précédente), et qu'il reste stationnaire tant que l'ébullition continue.

Ces deux températures (point de fusion de la glace, point d'ébullition de l'eau sous la pression de 76 centimètres) sont dites des *points fixes*. Nous allons montrer comment ils permettent d'effectuer une graduation de l'instrument, en prenant pour exemple le thermomètre le plus usuel, le thermomètre à mercure.

198. Construction du thermomètre à mercure. — Le thermomètre à mercure se compose d'un *réservoir* de verre, de forme généralement cylindrique, surmonté d'un tube étroit qu'on appelle la *tige* : le réservoir et la partie inférieure de la tige contiennent du mercure (*fig.* 159).

Les ouvriers qui travaillent le verre fabriquent des enveloppes thermométriques, qu'il reste seulement à emplir et à graduer. Ces enveloppes ont été façonnées en choisissant, pour former la tige, un tube capillaire *bien calibré*, c'est-à-dire ayant une section intérieure uniforme (*). Le réservoir R, soudé à la tige, est fait d'une portion de tube de verre à parois très minces, et dont le diamètre extérieur est à peu près égal à celui de la tige. A l'autre extrémité, on a soudé une boule de verre B (*fig.* 160) surmontée d'une pointe effilée, qui reste fermée jusqu'au moment où l'on introduira le liquide, afin d'empêcher la poussière et l'humidité de pénétrer dans l'appareil.

Pour introduire le mercure, on brise l'extrémité de la pointe, et, après avoir chauffé légèrement le réservoir R et la boule B pour dilater l'air intérieur, on plonge dans le mercure la pointe renversée (*fig.* 161) : l'air intérieur se contracte par le refroidissement et laisse entrer dans

(*) On reconnaît qu'un tube satisfait à cette condition, en constatant qu'une petite colonne de mercure, introduite dans l'intérieur et déplacée progressivement le long de ce tube, y présente toujours une longueur constante.

la boule une certaine quantité de mercure. Quand on juge cette quantité suffisante pour emplir au moins le réservoir R et a tige, on redresse l'instrument. — A ce moment, le mercure pénètre un peu dans la tige, mais, comme la tige est capillaire, l'air intérieur empêche le liquide de descendre jusque dans le réservoir R. On chauffe alors le réservoir, de manière que l'air, en se dilatant, fasse remonter tout le liquide dans la boule, et qu'une partie de cet air s'échappe dans l'atmosphère. On laisse ensuite refroidir le réservoir : la force élastique de l'air qu'il contient encore diminue, et une certaine quantité de mercure pénètre dans le réservoir, comme le représente la figure 160. — On fait alors bouillir le mercure, dont la vapeur entraine les dernières traces d'air et d'humidité. Enfin, on laisse refroidir : la vapeur mercurielle se condense, et le liquide de la boule vient remplir le réservoir et la tige.

Fig. 159.

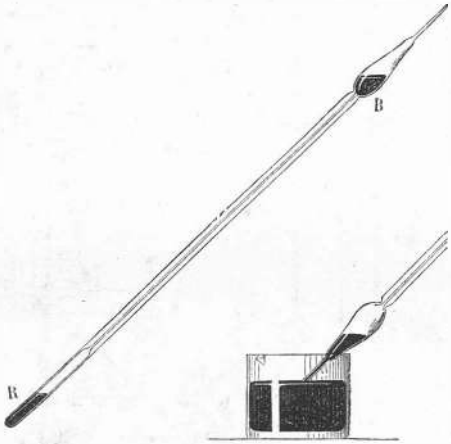


Fig. 160 et 161. — Construction du thermomètre à mercure.

L'instrument étant refroidi, on détache la boule B, en donnant un trait de lime sur le tube, et on porte l'instrument à une température un peu supérieure à la plus haute température pour laquelle il doive être employé : l'excédent de mercure s'échappe, et on ferme la tige à la lampe. Si les dimensions relatives de la tige et du réservoir ont été bien choisies, le mercure, revenu à la température ordinaire, doit rester encore dans la tige à une certaine distance du réservoir.

199. Graduation du thermomètre centigrade. — Pour graduer le thermomètre, on doit d'abord marquer sur la tige les deux *points fixes*, correspondants aux températures précédemment définies (197).

Pour déterminer la position du point fixe inférieur, on enfonce l'in-

strument dans un vase renfermant de la glace bien pure, finement râpée, et mouillée d'eau distillée, pour être certain que cette glace est *fondante* (*fig.* 162). Lorsque le niveau du mercure est devenu stationnaire, on marque sur la tige le point auquel il s'est arrêté. — Ce sera le *zéro* du thermomètre.

Pour déterminer la position du second point fixe, on peut employer l'appareil qui est représenté en coupe par la figure 163. La vapeur se

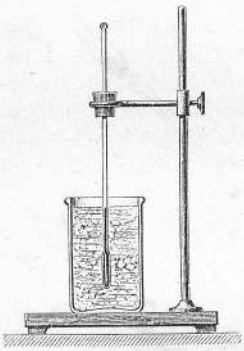


Fig. 162. — Détermination du zéro.

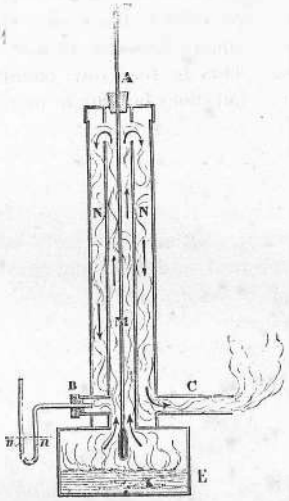


Fig. 163. Détermination du point 100°.

produit dans une petite chaudière E, placée sur un fourneau; elle s'élève dans la cheminée centrale M, redescend dans l'espace NN qui enveloppe le tube M, et s'échappe par l'ouverture C. Le thermomètre T est fixé dans la cheminée centrale par un bouchon A, son réservoir étant *à une petite distance de la surface de l'eau bouillante.* La vapeur qui circule autour de la tige est ainsi préservée de toute cause extérieure de refroidissement. Un petit manomètre à eau, adapté dans une tubulure B qui débouche dans la cheminée centrale, permet de vérifier que la pression intérieure est égale à la pression atmosphérique; nous supposerons que la hauteur barométrique, au moment de l'expérience, soit de 76^{cm} (*). — De temps à autre, on soulève le thermomètre, en le faisant glisser dans son bouchon, pour voir le sommet de la colonne;

(*) Si la hauteur barométrique était notablement différente de 76 centimètres, on devrait faire subir à l'échelle une correction; on en calculerait la valeur, en sachant que pour un accroissement ou une diminution de pression de 27 millimètres, la température d'ébullition de l'eau s'élève ou s'abaisse de 1 degré.

lorsque le niveau est devenu fixe, on marque sur la tige le point qui lui correspond. — Ce sera le point 100 de la graduation.

Il ne reste plus qu'à partager en 100 parties égales la distance qui sépare les deux points fixes; chacune de ces divisions est un *degré* de l'instrument. — On prolonge la division, s'il y a lieu, au-dessus du centième degré. Enfin, on marque encore, au-dessous du zéro, des divisions égales aux précédentes, qui forment ainsi une échelle descendante, pour les températures inférieures à celle de la fusion de la glace.

Dans les notations, on fait précéder du signe — les nombres qui indiquent ces dernières températures, pour les distinguer des températures supérieures à 0°. Ainsi, — 25° désigne une température de 25 degrés au-dessous de zéro, tandis que + 25°, ou simplement 25°, désigne une température de 25 degrés au-dessus de zéro.

200. Autres échelles thermométriques. — L'échelle thermométrique que nous venons de définir, et qui est aujourd'hui adoptée par tous les savants, est l'échelle *centigrade*. — Dans l'*échelle de Réaumur*, longtemps usitée en France, le point correspondant à la vapeur d'eau bouillante est marqué 80; par suite, 80 degrés de Réaumur valent 100 degrés centigrades. — L'*échelle de Fahrenheit* est encore fréquemment employée en Angleterre; les degrés 32 et 212 correspondent à la glace fondante et au point d'ébullition de l'eau sous la pression normale; par suite, 100 degrés centigrades valent 212 — 32 ou 180 degrés de Fahrenheit.

Etant donnée une température évaluée en degrés de l'une de ces trois échelles, il est toujours facile d'en déduire, par un calcul simple, l'évaluation en degrés de l'une des deux autres. — Soient C, R et F les nombres qui correspondent à une même température, en degrés centigrades, Réaumur et Fahrenheit : on aura les relations :

$$\frac{R}{C} = \frac{80}{100} \quad \text{et} \quad \frac{F - 32}{C} = \frac{180}{100};$$

Ces relations suffiront, étant donné C par exemple, pour calculer R ou F; ou réciproquement.

201. Déplacement du zéro. — Lorsqu'on reprend un thermomètre construit depuis un certain temps, et qu'on le soumet de nouveau aux deux opérations qui ont servi à déterminer les points fixes, on observe, en général, que le mercure s'arrête en des points un peu plus élevés que les points primitivement obtenus.

Le déplacement des points fixes est surtout notable lorsque le réservoir a été soufflé, par la fusion du verre, dans l'épaisseur des parois de la tige; le refroidissement ayant toujours été assez brusque, le verre a subi une véritable *trempe*, qui a fait conserver au réservoir une capacité supérieure à celle qu'il aurait dû prendre à la température ordinaire. Les variations de température, généralement lentes, qu'il subit

ensuite, par l'usage, font éprouver au réservoir un *recuit*, et par suite une diminution de capacité, qui explique le phénomène observé.

Quand on veut employer un thermomètre à des recherches précises, on doit donc d'abord déterminer, en replongeant l'instrument dans la glace fondante, le nombre de divisions dont son zéro a pu s'être déplacé : on retranchera ce nombre de toutes les indications fournies ultérieurement par l'instrument.

202. Thermomètre à alcool. — Le mercure se solidifie à la température de — 40° C.; le thermomètre à mercure ne peut donc pas servir à évaluer les températures très basses, celles qu'on rencontre, par exemple, dans les contrées polaires. On remplace alors le mercure par l'alcool. — Dans les thermomètres grossièrement construits, on emploie de l'alcool coloré en rouge par la teinture d'orseille; mais cette matière a l'inconvénient de s'altérer à la longue.

Le procédé d'emplissage est plus simple que pour le thermomètre à mercure : il n'est plus nécessaire de souder une boule à la partie supérieure de la tige, comme dans la figure 160. — On chauffe simplement le réservoir, pour dilater l'air intérieur, et on plonge ensuite dans l'alcool l'extrémité ouverte de la tige; lorsque le refroidissement a fait monter un peu de liquide dans le thermomètre, on le redresse, et on fait bouillir l'alcool dans le réservoir, de manière à chasser l'air. L'ébullition s'effectuant à une température beaucoup plus basse que pour le mercure (environ 78° C.), on peut plonger de nouveau la tige dans l'alcool, et laisser le liquide froid arriver dans le réservoir, sans craindre la rupture du verre (*). — On ferme ensuite à la lampe l'extrémité de la tige, en laissant un peu d'air au-dessus du liquide.

En général, on ne prolonge pas l'échelle jusqu'à la température d'ébullition de l'eau : à cette température (supérieure de 22 degrés à celle où l'alcool entre en ébullition), l'alcool émet des vapeurs dont la force élastique pourrait briser l'enveloppe. Pour graduer l'instrument, après avoir déterminé le zéro par le procédé ordinaire, on détermine un second point de l'échelle, en plongeant le thermomètre dans un bain plus ou moins tiède, dont la température est donnée exactement par un thermomètre à mercure.

203. De la sensibilité dans les thermomètres. — Dans les thermomètres, on distingue deux sortes de sensibilité, qui correspondent à des conditions de construction bien distinctes.

La première est la propriété de se mettre *rapidement* en équilibre

(*) En procédant ainsi, on observe que l'alcool s'élève dans l'instrument renversé, de manière à remplir la capacité de la tige et du réservoir; il reste cependant toujours, dans le réservoir, une petite bulle de gaz, provenant de l'air qui était dissous dans l'alcool et qui s'en est dégagé. Pour chasser cette bulle, on redresse l'instrument, on l'attache à l'extrémité d'une ficelle, et on le fait tourner comme une fronde : ce mouvement, chassant l'alcool vers les points les plus éloignés du centre de rotation, force la bulle d'air à se dégager par la surface libre du liquide.

de température avec les corps environnants : cette sorte de sensibilité est d'autant plus grande que les dimensions *absolues* du réservoir sont moindres.

La seconde est la propriété d'apprécier, avec exactitude, de *petites variations* de température. A ce point de vue, un thermomètre est d'autant plus sensible, que le degré occupe sur la tige une plus grande longueur, et peut se subdiviser en un plus grand nombre de parties perceptibles. Cette condition exige, contrairement à la précédente, que l'on augmente autant que possible la capacité du réservoir, en diminuant autant que possible le diamètre de la tige.

Suivant les usages auxquels l'instrument est destiné, on cherche à lui donner l'une ou l'autre de ces sortes de sensibilité.

204. Choix de la substance thermométrique. — Thermomètre normal. — Nous avons pris jusqu'ici, comme substance thermométrique, un *liquide*, mercure ou alcool, enfermé dans une enveloppe de verre. — On pourrait aussi construire des thermomètres *solides*, présentant une disposition plus ou moins semblable à celle de la figure 154; de pareils thermomètres seraient peu sensibles. — Au contraire, un thermomètre à *gaz*, disposé comme l'appareil de la figure 157, présenterait une très grande sensibilité.

Tous ces thermomètres, solides, liquides ou gazeux, seraient évidemment d'accord aux températures des deux points fixes; mais il n'est pas certain qu'ils dussent fournir toujours les mêmes indications numériques, quand ils seraient plongés dans un milieu à une température quelconque. Il est donc nécessaire de choisir l'un de ces appareils, qui prendra le nom de *thermomètre normal*, et qui définira exactement les températures. — Le choix de la substance thermométrique repose sur les principes suivants :

1° Le thermomètre normal doit rester toujours *comparable à lui-même;* c'est-à-dire que, dans un milieu à température invariable, il doit toujours, à quelque époque que ce soit, marquer le même degré;

2° Les divers instruments doivent être *comparables entre eux;* c'est-à-dire qu'ils doivent marquer simultanément la même température, quand ils sont placés dans un même milieu.

Or la plupart des corps solides, et les métaux en particulier, lorsqu'ils sont soumis à des alternatives de dilatation et de contraction, éprouvent, dans leur structure, des changements qui modifient leur dilatabilité; dès lors, un thermomètre formé d'une barre métallique pourrait, à des époques diverses, ne pas rester comparable à lui-même.

Un liquide, lorsqu'il est pur, reste toujours identique à lui-même; mais le liquide est nécessairement contenu dans une enveloppe solide, et comme on n'observe que les variations apparentes du volume, variations qui dépendent de la dilatation de l'enveloppe (194), les indications fournies par un thermomètre à liquide pourraient varier d'un

instrument à un autre. Un thermomètre à liquide ne peut donc pas non plus être choisi comme thermomètre normal (*).

Le thermomètre *normal* ne peut donc être qu'un *thermomètre à gaz*. — Un gaz étant toujours enfermé dans une enveloppe, on pourrait craindre que l'inconvénient signalé pour les liquides ne se présentât encore. Mais, en raison de la grande dilatabilité des gaz, les irrégularités de la dilatation de l'enveloppe sont négligeables par rapport à la dilatation observée; l'expérience prouve que, pour la pratique, deux thermomètres à gaz sont toujours comparables entre eux, quelle que soit la nature du verre qui forme leur enveloppe.

On a choisi l'*air sec*, plutôt qu'un autre gaz, parce qu'on peut facilement se le procurer toujours identique à lui-même.

205. Thermomètre à air. — Définition précise du degré. — On peut donner au thermomètre à air deux dispositions différentes, dont les figures 157 et 158 peuvent être considérées comme des représentations grossières.

Dans la première disposition (*fig.* 157), on évalue la température par *la variation de volume* de l'air, sous pression constante. Mais alors, plus la température s'élève, plus grande est la masse d'air qui sort du réservoir pour passer dans la tige; si, comme il arrive le plus souvent, la tige est placée en dehors du milieu dont on veut évaluer la température, il en résulte une cause d'erreur qui va en croissant avec la température elle-même.

Pour cette raison, on préfère donner au thermomètre à air une disposition semblable à celle de la figure 158, et sur laquelle nous reviendrons plus loin, avec détails. L'appareil est réglé de façon que, la masse d'air étant placée dans la glace fondante, sa pression soit égale à la pression normale. Quand la température s'élève, on maintient le volume invariable, en ajoutant du liquide dans la branche qui sert de manomètre; la température est alors évaluée par la *variation de force élastique* de l'air, sous volume constant.

Nous appellerons *degré*, la variation de température qui produit, sur une masse d'air assujettie à conserver un volume constant, une variation de force élastique égale à la centième partie de celle qu'elle éprouve entre la température de la glace fondante et celle de la vapeur d'eau bouillante.

206. Emploi du thermomètre à mercure, préalablement comparé au thermomètre normal. — L'évaluation d'une température au moyen

(*) En raison du déplacement du zéro (201), un même thermomètre à mercure ne reste même pas toujours comparable à lui-même. — D'autre part, l'expérience montre que deux thermomètres à mercure, construits, l'un avec du verre ordinaire, l'autre avec du cristal, et récemment gradués, sont sensiblement d'accord entre 0° et 100°; mais, à des températures élevées, à 250° par exemple, l'écart de leurs indications peut atteindre 3 degrés. — Le défaut de comparabilité est encore bien plus accentué dans les thermomètres à alcool.

d'un thermomètre à air constitue une véritable expérience, et exige un opérateur exercé. Pour la pratique, il y a avantage à employer des thermomètres à *liquides*, qui donnent des indications immédiates par une simple lecture.

Parmi les liquides, on a choisi le *mercure*, pour de nombreuses raisons : 1° le mercure peut être obtenu dans un état de pureté parfaite, condition indispensable pour que les liquides de tous les instruments soient toujours identiques entre eux; 2° le point de congélation du mercure (— 40°) est très éloigné de son point d'ébullition (+ 360°), et la plupart des températures usuelles sont comprises dans l'intervalle de ces deux points; 3° le mercure se met rapidement en équilibre de température avec les corps environnants.

Quand on tient compte du déplacement du zéro (201), l'expérience montre qu'un thermomètre à mercure, soigneusement gradué, reste d'accord avec le thermomètre à air entre 0° et 100°; il indique donc exactement les températures comprises entre ces limites. — Il n'en est plus de même aux températures supérieures à 100°. Ainsi quand le thermomètre normal, plongé dans un bain, marque 200°, tel thermomètre à mercure marquera 199°, tel autre marquera 201°. Dès lors, si l'on veut faire usage d'un thermomètre à mercure pour déterminer avec précision des températures notablement supérieures à 100°, on devra préalablement le comparer au thermomètre normal, et dresser une table indiquant les températures exactes qui correspondent aux indications de l'instrument.

CHAPITRE II

MESURE DES DILATATIONS

I. — DILATATIONS DES CORPS SOLIDES.

207. Coefficients de dilatation linéaire. — L'expérience montre que, si l'on fait subir à une même barre métallique des variations de température peu considérables, et comprises par exemple entre 0° et 150°, elle éprouve des variations de longueur *sensiblement proportionnelles* à ces variations de température.

On appelle *coefficient de dilatation linéaire* d'une barre solide, *le nombre qui exprime l'allongement éprouvé par l'unité de longueur de cette barre, lorsque sa température s'élève d'un degré.*

208. Formules relatives aux dilatations linéaires. — Connaissant la longueur L_0 d'une barre à 0°, et son coefficient de dilatation linéaire l, proposons-nous de calculer la longueur L de cette barre à t degrés. — Puisque l'unité de longueur de la barre s'allonge de l en passant de 0° à 1°, elle s'allonge de lt en passant de 0° à t degrés; par suite, la longueur L_0, pour cette même variation de température, s'allonge de la quantité $L_0 lt$. La longueur totale de la barre devient donc $L_0 + L_0 lt$, c'est-à-dire que l'on a

$$L = L_0 (1 + lt). \tag{1}$$

La quantité $1 + lt$ a reçu le nom de *binôme de dilatation*.

Inversement, si l'on connaît la longueur L d'une barre à t degrés, et son coefficient de dilatation linéaire l, pour calculer la longueur L_0 de cette barre à 0°, on aura

$$L_0 = \frac{L}{1 + lt}. \tag{2}$$

Enfin, connaissant la longueur L à t degrés, il est facile d'en déduire la longueur L′ à t' degrés. — En effet, si l'on prend pour inconnue auxiliaire la longueur L_0 de la barre à la température de 0°, on a (1)

$$L' = L_0 (1 + lt'),$$

et en remplaçant L_0 par sa valeur (2),

$$L' = L\,\frac{1 + lt'}{1 + lt} \quad (5)$$ (*).

209. Mesure des dilatations linéaires : principe de la méthode de Lavoisier et Laplace. — Diverses méthodes ont été employées pour déterminer les coefficients de dilatation linéaire des corps solides. Voici celle qui a été suivie par Lavoisier et Laplace, en 1782.

Concevons une barre d'environ 2 mètres, placée sur des rouleaux, et s'appuyant par l'une de ses extrémités contre un talon fixe A (*fig.* 164);

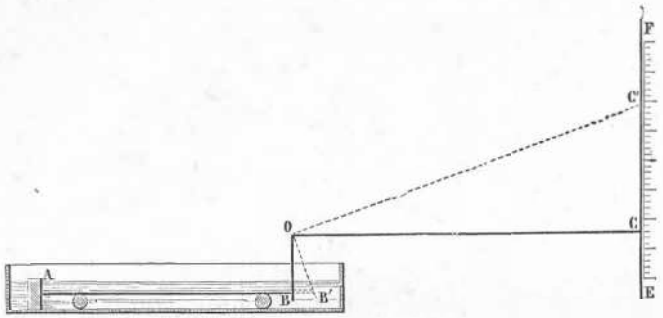


Fig. 164.

par son autre extrémité B, contre la petite branche d'un levier coudé BOC, mobile dans un plan vertical autour du point O. Imaginons, en outre, une échelle EF disposée verticalement en regard du levier. — Soit BB' l'allongement qu'éprouve la barre AB, lorsqu'on la fait passer de 0° à t degrés; à cette dernière température, le levier prendra la position B'OC'. Les triangles semblables BOB' et COC' donnent

$$BB' = CC'\,\frac{OB}{OC}.$$

(*) Au lieu de cette relation entre L et L', on peut en employer une autre, qui n'est qu'approchée. — En effectuant la division $\frac{1 + lt'}{1 + lt}$, on obtient pour quotient

$$1 + l(t' - t) - l^2 t(t' - t) + \ldots;$$

or, le nombre l étant toujours une fraction très petite, on peut considérer comme négligeables les termes en l^2, l^3..., à côté du terme en l, et prendre, pour valeur approchée de ce quotient, $1 + l(t' - t)$. Il vient alors

$$L' = L\left[1 + l(t' - t)\right],$$ (3 *bis*)

relation qui offre avec la formule (1) une analogie remarquable : elle indique que, pour déduire de la longueur L, correspondante à une température quelconque t, la longueur L' correspondante à une autre température t', il suffit encore de multiplier

Pour obtenir l'allongement BB′ de la barre, il suffira donc de mesurer le déplacement CC′ de l'extrémité C de la grande branche du levier, sur l'échelle divisée, et de multiplier ce déplacement par le rapport des deux bras de levier OB et OC, lequel aura été déterminé une fois pour toutes (*). — Pour en déduire le coefficient de dilatation linéaire, on divisera la quantité BB′ par la longueur initiale de la barre et par la variation de température t.

210. Appareil de Lavoisier et Laplace. — La barre AB, reposant sur des rouleaux de verre, et maintenue par deux paires de tiges verticales J, J, était placée dans une auge métallique, établie entre quatre piliers de maçonnerie P (*fig.* 165); dans cette auge, on plaçait d'abord

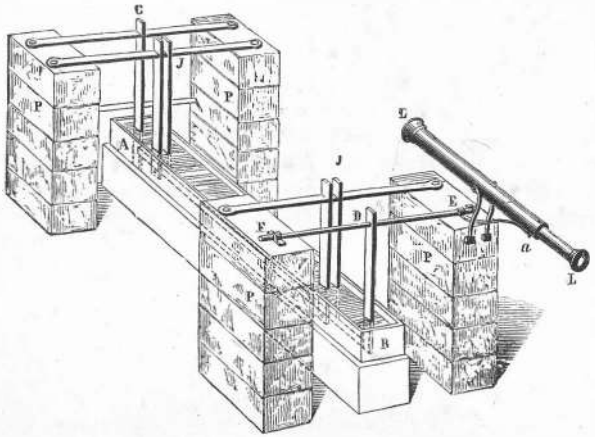


Fig. 165. — Dilatation linéaire des corps solides; appareil de Lavoisier et Laplace.

de la glace fondante, et on la remplaçait ensuite par de l'eau bouillante ou de l'huile. L'extrémité A s'appuyait contre la tige de verre verticale C, fixée solidement aux massifs de maçonnerie. L'extrémité B venait s'appuyer contre une tige semblable D, qui constituait la petite branche du levier coudé : cette tige était fixée à une traverse horizontale FE qui, en tournant autour de son axe, entraînait la tige métallique Ea et la lunette LL; enfin, on avait installé, en regard de la lunette, à environ 200 mètres de distance, une règle verticale divisée. Le rayon visuel dirigé suivant l'axe de la lunette constituait ici la grande branche du levier coudé.

la première longueur par le binôme de dilatation $1 + l\,(t' - t)$, relatif à la *variation de température.*

(*) Dans les expériences de Lavoisier et Laplace, ce rapport était égal à $\frac{1}{744}$, en sorte qu'on avait $BB' = \frac{1}{744} CC'$. — On voit que l'erreur commise dans la mesure de CC′ était divisée par 744, et BB′ était ainsi déterminé avec une grande précision.

211. Résultats relatifs aux dilatations linéaires. — Nous avons admis (207) qu'une même barre solide s'allonge, entre des limites de température suffisamment rapprochées, d'une quantité *constante* pour chaque élévation de température d'un degré. S'il en est ainsi, l'allongement BB′ qu'éprouve la barre AB, en passant de 0° à $t°$, doit être proportionnel au nombre t; en d'autres termes, le quotient $\frac{BB'}{t}$, qui exprime *l'allongement moyen* de cette barre pour une élévation de température d'un degré, entre 0° et $t°$, doit être constant, quel que soit t. Les expériences de Laplace et Lavoisier ont permis de constater qu'il en est ainsi lorsque t ne dépasse pas 100°.

Mais, d'autre part, Dulong et Petit ont montré plus tard que, au-dessus de 100°, l'allongement moyen, pour une élévation de température d'un degré, augmente sensiblement à mesure que la température s'élève. — Dès lors, les coefficients de dilatation fournis par les expériences ne sont applicables, en toute rigueur, que pour des températures comprises entre les limites de ces expériences elles-mêmes.

Enfin, un même corps solide peut fournir des résultats un peu différents, selon les actions mécaniques auxquelles il a été soumis par le martelage ou l'écrouissage. — Il arrive aussi qu'une même barre, lorsqu'elle a éprouvé des variations de température un peu considérables, ne présente plus, quand on la soumet à une expérience nouvelle, exactement le même coefficient de dilatation.

Le tableau ci-après donne, pour quelques corps solides, la moyenne des résultats obtenus, soit par divers expérimentateurs, soit sur divers échantillons.

	COEFFICIENTS DE DILATATION LINÉAIRE.
Acier non trempé	0,000 011
Acier trempé	0,000 013
Argent	0,000 019
Cuivre	0,000 017
Étain	0,000 020
Fer	0,000 012
Laiton	0,000 018
Or	0,000 015
Platine	0,000 008
Plomb	0,000 028
Verre	0,000 008
Zinc	0,000 031

212. Dilatation cubique. — On appelle *coefficient de dilatation cubique* d'un corps, *le nombre qui exprime l'accroissement éprouvé par l'unité de volume de ce corps, lorsque sa température s'élève d'un degré.*

Si l'on désigne par V_0 le volume d'un corps à 0°, par V son volume à t degrés, et par k son coefficient de dilatation cubique, on a la relation

$$V = V_0 (1 + kt), \qquad (1)$$

que l'on établirait en raisonnant comme pour la relation analogue, relative aux dilatations linéaires (208). — On en déduit

$$V_0 = V\frac{1}{1+kt}. \qquad (2)$$

Enfin, si l'on désigne par V′ le volume du corps à t' degrés, on a

$$V' = V\frac{1+kt'}{1+kt}\ (*). \qquad (3)$$

Nous aurons souvent à faire usage de ces formules.

213. Relations entre les densités d'un même corps à différentes températures. — Les densités d'un même corps, à différentes températures, sont inversement proportionnelles aux volumes qu'il occupe. En effet, si l'on désigne par V_0 et D_0 le volume et la densité d'un corps à 0°, par V et D son volume et sa densité à t degrés, on a, en écrivant que la masse M reste la même :

$$M = V_0D_0 = VD.$$

En remplaçant V par sa valeur $V_0(1 + kt)$, et supprimant le facteur V_0, on a :

$$D = \frac{D_0}{1+kt}. \qquad (1)$$

On aura de même, à une autre température t',

$$D' = \frac{D_0}{1+kt'}. \qquad (2)$$

En divisant les relations (1) et (2) membre à membre, il vient

$$\frac{D}{D'} = \frac{1+kt'}{1+kt}; \qquad (3)$$

c'est-à-dire que *les densités d'un même corps, à deux températures différentes, sont inversement proportionnelles aux binômes de dilatation cubique.*

214. Relation entre le coefficient de dilatation linéaire et le coefficient de dilatation cubique d'un même corps. — Les coefficients de dilatation linéaire des divers corps ayant été déterminés par l'expérience, on peut se dispenser de nouvelles expériences pour déterminer les coefficients de dilatation cubique de ces mêmes corps.

(*) On démontrerait comme plus haut (note de la page 161) que cette relation peut être remplacée par la relation *approchée* suivante :

$$V' = V\Big(1 + k(t' - t)\Big). \qquad (3\ bis)$$

En effet, représentons par l le coefficient de dilatation linéaire d'un corps, du fer par exemple, et par k son coefficient de dilatation cubique. Si l'on imagine un cube de fer ayant pour côté l'unité de longueur à la température de 0°, et si l'on porte sa température à 1°, chaque côté de ce cube acquiert une longueur $1 + l$; donc, si l'on prend l'unité de volume correspondante à l'unité de longueur, le volume de ce cube devient $(1 + l)^3$, c'est-à-dire $1 + 3l + 3l^2 + l^3$; par suite, son *accroissement de volume* est exprimé par $3l + 3l^2 + l^3$. Or, cet accroissement n'est autre chose que le coefficient de dilatation cubique k; on a donc

$$k = 3l + 3l^2 + l^3.$$

Mais, pour tous les corps solides, l est toujours exprimé par un nombre très petit, comme le montre le tableau de la page 163; le carré l^2 et le cube l^3 sont des nombres encore beaucoup plus petits. Il en résulte que, si l'on calculait k en remplaçant l par sa valeur dans les trois termes du second membre, le second et le troisième terme n'augmenteraient le résultat fourni par le premier terme seul, que d'une quantité plus petite que l'erreur commise dans la détermination du premier terme (*). On doit donc les négliger et on écrira :

$$k = 3l.$$

Dès lors, pour obtenir les coefficients de dilatation cubique des divers corps inscrits dans le tableau précédent, il suffira de multiplier par 3 tous les nombres de ce tableau.

215. Dilatation des enveloppes. — Nous avons montré précédemment, par une expérience assez grossière (193), que la capacité d'une enveloppe solide augmente, sous l'action de la chaleur, comme le volume d'une masse *de la même substance* qui remplirait cette enveloppe. On a pu constater, par des expériences plus précises, qu'il en est toujours rigoureusement ainsi. — Il résulte de là que, si l'on considère un réservoir de verre, par exemple, et si l'on se propose de calculer les variations de son volume intérieur pour des variations de température déterminées, il suffira de connaître le coefficient de dilatation cubique du verre, et de procéder comme s'il s'agissait d'une masse de verre, remplissant la capacité du réservoir.

Mais, pour ce qui est de la connaissance précise de ce coefficient de dilatation, on ne doit pas se contenter de déterminations effectuées sur des échantillons de verres plus ou moins semblables à celui qui

(*) Effectuons, par exemple, ce calcul pour le fer, dont le coefficient de dilatation linéaire est égal à 0,000 012; on aurait, pour le second et le troisième terme :

$$3l^2 = 0{,}000\,000\,000\,432; \qquad l^3 = 0{,}000\,000\,000\,001\,728;$$

la valeur de l n'étant connue *qu'à moins d'une unité du sixième ordre décimal* près, on doit négliger $3l^2$ et l^3, qui sont deux quantités beaucoup plus petites qu'une unité du septième ordre décimal.

forme l'enveloppe dont il s'agit. — Il est nécessaire de déterminer le coefficient de dilatation, sur cette enveloppe elle-même. Cette méthode de détermination est fondée sur la connaissance de la dilatation des liquides, comme on le verra plus loin (220 et 221).

II. — DILATATIONS DES LIQUIDES.

216. Dilatations apparentes et dilatations absolues. — Lorsqu'on chauffe un liquide placé dans un vase (*fig.* 156), on observe la *dilatation apparente* du liquide dans ce vase (194). — Pour obtenir la *dilatation absolue* du liquide, il semble que le seul moyen consiste à tenir compte de la dilatation du vase qui le contient. La méthode suivante, dont le principe est dû à Boyle, et qui a été appliquée par Dulong et Petit et par Regnault à l'étude de la dilatation absolue du mercure, fournit un résultat indépendant de la dilatation du vase.

217. Détermination du coefficient de dilatation absolue du mercure : principe de la méthode de Dulong et Petit. — Deux tubes verticaux AB et CD (*fig.* 166), ayant un diamètre de quelques centimètres, communiquent entre eux par un tube capillaire deux fois recourbé BEFD, dont la branche EF est horizontale : on y a introduit du mercure. On refroidit à 0° le liquide contenu dans la branche AB, tandis qu'on chauffe à une température connue T celui de la branche CD; il s'établit de part et d'autre une différence de densité, et par suite une différence de niveau. En raisonnant comme on l'a fait pour les vases communicants (78), on voit que les hauteurs des niveaux m et n, au-dessus de l'axe du tube horizontal EF, doivent être en raison inverse des densités du liquide dans les deux branches. En désignant donc par h_0 et D_0 la hauteur et la densité du mercure à 0°, par h et D la hauteur et la densité du mercure à T degrés, on a

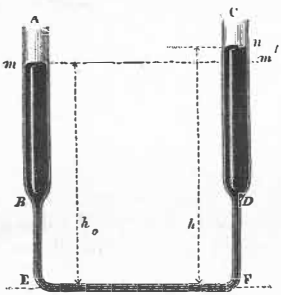


Fig. 166.

$$\frac{h}{h_0} = \frac{D_0}{D}.$$

Mais, si l'on désigne par m le coefficient de dilatation absolue du mercure, nous avons vu (213) que les densités D_0 et D sont inversement proportionnelles aux binômes de dilatation correspondants aux températures 0° et T, c'est-à-dire aux quantités 1 et $1 + mT$; on a donc

$$\frac{D_0}{D} = 1 + mT, \quad \text{et par suite,} \quad \frac{h}{h_0} = 1 + mT.$$

De cette équation on tire la valeur de m,

$$m = \frac{h - h_0}{h_0 T}.$$

Pour déterminer le coefficient de dilatation absolue m, il suffira donc de mesurer la température T, la différence de niveau $h - h_0$, et la hauteur h_0. C'est ce qu'ont fait Dulong et Petit.

218. Appareil de Dulong et Petit. — Le tube EF, qui réunit les deux branches, était fixé à une règle de fonte MNP (*fig.* 167), en forme

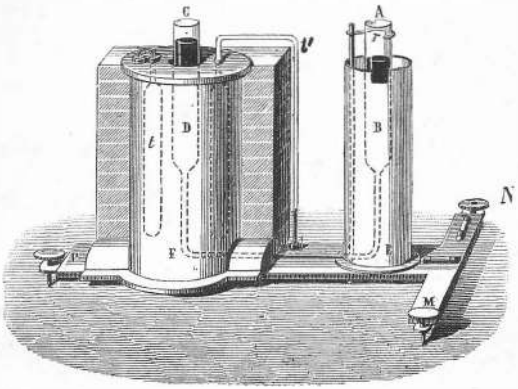


Fig. 167. — Dilatation absolue du mercure ; appareil de Dulong et Petit.

de T, que l'on rendait horizontale au moyen de vis calantes et de deux niveaux à bulle d'air placés à angle droit. Le tube AB était environné d'un manchon de fer-blanc, qu'on emplissait de glace fondante : une tige de fer verticale, contenue dans le manchon, se terminait par un crochet dont l'extrémité r servait de repère. — L'autre branche CD était entourée d'un manchon de cuivre, contenant de l'huile. On chauffait l'huile au moyen d'un fourneau en briques, qui environnait le manchon de toutes parts ; un thermomètre à poids t et un thermomètre à air t', comme ceux dont nous indiquerons plus loin le mode d'emploi, donnaient la température de l'huile.

Pour faire une observation, on laissait la température s'élever lentement, jusque près du point qu'on voulait atteindre. On fermait alors toutes les ouvertures du fourneau ; le tirage étant arrêté, la température continuait d'abord à monter, puis atteignait un maximum, où elle se maintenait quelque temps stationnaire avant de descendre. On profitait de cet instant pour effectuer les observations ; à cet effet, on versait dans la branche AB une petite quantité de mercure à 0°, de manière à élever le niveau dans l'autre branche un peu au-dessus du

manchon, et l'on écartait la glace autour du sommet de la colonne mercurielle en A. Les deux niveaux étant ainsi rendus visibles, on mesurait au cathétomètre les distances verticales du repère r au-dessus des plans de ces niveaux : la différence de ces distances était la quantité $h - h_0$. — En même temps, on notait les indications des deux thermomètres. — Enfin la hauteur du repère r au-dessus de l'axe du tube EF ayant été déterminée une fois pour toutes, il suffisait d'en retrancher la hauteur du même repère au-dessus du niveau du mercure froid, pour avoir la hauteur h_0.

Dulong et Petit ont trouvé, pour le coefficient de dilatation absolue du mercure, entre 0° et 100°, la valeur $\frac{1}{5550}$, ou, en fraction décimale, 0,000 180. — Regnault a trouvé plus tard une valeur très peu différente, avec un appareil qui donne des résultats plus précis.

219. Méthode générale pour déterminer les coefficients de dilatation absolue des liquides autres que le mercure. — La dilatation absolue du mercure étant connue, on emploie, pour les autres liquides, une méthode fondée sur cette remarque que, lorsqu'un liquide placé dans une enveloppe éprouve une élévation de température, on peut considérer la *dilatation absolue* comme *égale à la somme de la dilatation apparente et de la dilatation de l'enveloppe* (*).

Dès lors, si, dans une enveloppe de verre, on fait une première expérience avec du mercure, l'observation de la dilatation apparente permettra de calculer la *dilatation de l'enveloppe*, puisque la dilatation absolue du mercure sera connue. — Si maintenant, dans ce même vase, on fait une seconde expérience avec un autre liquide quelconque, l'observation de la dilatation apparente permettra de calculer la *dila-*

(*) Pour le démontrer, supposons le liquide placé dans une enveloppe graduée en parties d'égales capacités, la capacité d'une division à la température 0° étant prise pour unité de volume. Soit V_0 le volume du liquide à 0°, soit V le volume *apparent* à t degrés. L'accroissement de volume apparent est de $V - V_0$; par suite, l'accroissement apparent éprouvé par l'unité de volume, ou la *dilatation apparente*, est $\Delta = \frac{V - V_0}{V_0}$. Nous allons évaluer cette expression au moyen de la dilatation absolue et de la dilatation de l'enveloppe.

Si l'on désigne par K la dilatation éprouvée par l'unité de volume de la matière de l'enveloppe entre 0 et t, chacune des divisions observées à t degrés vaut $1 + K$, en sorte que le volume réel de la partie de l'enveloppe occupée par le liquide à t degrés est $V(1 + K)$. D'autre part, si l'on désigne par D la dilatation absolue de l'unité de volume du liquide entre 0 et t, le volume du liquide à t degrés est $V_0(1 + D)$. Or le volume réel du contenant à t degrés est égal au volume réel du contenu : donc,

$$V(1 + K) = V_0(1 + D),$$

d'où l'on tire

$$\Delta = \frac{V - V_0}{V_0} = \frac{D - K}{1 + K} \qquad \text{et} \qquad D = \Delta(1 + K) + K.$$

Or, d'après ce qu'on a vu sur la dilatation des corps solides, le nombre K est toujours très petit *par rapport à l'unité*, en sorte que le second membre se réduit sensiblement à $\Delta + K$; c'est ce qu'exprime l'énoncé qui précède.

tation absolue du liquide, puisque l'expérience précédente fournira la dilatation de l'enveloppe.

Pour ces deux opérations, on peut employer soit le procédé du *thermomètre à poids*, soit le procédé du *thermomètre à tige*.

220. Procédé du thermomètre à poids. — Dulong et Petit faisaient usage d'un vase de verre d'une forme particulière, dit *thermomètre à poids*. C'est un réservoir de verre R (*fig.* 168), surmonté d'un tube *t* recourbé en forme de crochet, et terminé en pointe. — Avec cet instrument, les deux opérations que l'on vient d'indiquer s'effectuent de la manière suivante :

Fig. 168. Thermomètre à poids.

1° *Détermination du coefficient de dilatation de l'enveloppe.* — L'enveloppe de verre ayant été pesée, on l'emplit de mercure (en opérant comme pour un thermomètre ordinaire); on l'environne de glace fondante, en plongeant la pointe dans le mercure, de manière qu'il se remplisse complètement de mercure à la température de 0°, et on le pèse de nouveau : l'accroissement de poids P est le poids du mercure qui remplit l'enveloppe à 0°. — On introduit alors l'appareil dans une enceinte à une température connue T (on peut le porter, par exemple, à 100°, en l'introduisant dans l'étuve de la figure 163); une petite quantité de mercure s'échappe par l'extrémité du tube; on la recueille dans une coupelle, et on détermine son poids p. Le poids du mercure restant est $P - p$.

Or, si l'appareil était ramené à 0°, le mercure restant laisserait un espace vide dont le volume représenterait sa contraction apparente dans le verre, en revenant de T à 0°, ou sa dilatation apparente de 0° à T; ce volume serait d'ailleurs précisément celui qui était occupé par le poids p de mercure à 0°. D'autre part, les volumes peuvent être représentés par les poids de mercure à 0° qui leur correspondent : dès lors, p représente la dilatation, dans le verre, d'une quantité de mercure représentée par $P - p$, pour une variation de température de T degrés. Par suite, le *coefficient de dilatation apparente*, ou la dilatation apparente μ de l'unité de volume, pour une élévation de température d'un degré, est

$$\mu = \frac{p}{(P - p)\,T};$$

en retranchant ce coefficient du coefficient de dilatation absolue du mercure $\frac{1}{5550}$, on a le coefficient de dilatation k de l'enveloppe,

$$k = \frac{1}{5550} - \mu \ (*).$$

(*) Dulong et Petit ont trouvé, pour le coefficient de dilatation apparente μ du mercure, dans les enveloppes de verre qu'ils employaient, la valeur $\frac{1}{6480}$. Il en ré-

2° *Détermination du coefficient de dilatation d'un liquide quelconque.* — On reprend la même enveloppe; on y introduit le liquide dont on cherche le coefficient de dilatation absolue d, et on répète la même série d'opérations. Soit P′ le poids du liquide qui remplit l'appareil à 0°, et p' le poids qui s'en échappe à la température T′; le coefficient de dilatation apparente δ de ce liquide dans le verre est

$$\delta = \frac{p'}{(P' - p')T'};$$

par suite, le coefficient de dilatation d du liquide est

$$d = \delta + k,$$

k étant connu par l'expérience précédente.

Cette méthode n'exige aucune graduation à effectuer sur l'enveloppe. Elle n'a d'autre limite d'exactitude que celle de la sensibilité de la balance. — On verra plus loin (248) comment le même instrument peut aussi servir à déterminer les températures.

221. Procédé du thermomètre à tige. — On prend une enveloppe thermométrique ordinaire, dont nous supposerons la tige bien cylindrique et préalablement partagée en divisions d'égales longueurs. On détermine, par une expérience préliminaire, le nombre N qui représente la capacité du réservoir jusqu'au zéro de la graduation, en prenant pour unité la capacité d'une division (*). — On effectue ensuite les deux opérations suivantes :

sulte que le coefficient de dilatation de ce verre était $\frac{1}{5550} - \frac{1}{6480}$, ou sensiblement $\frac{1}{38670}$. — Lorsqu'on veut se contenter d'évaluer approximativement la dilatation d'une enveloppe formée d'un verre quelconque, on peut faire usage de ce coefficient; mais lorsqu'il s'agit de recherches précises, il est indispensable de déterminer toujours, en opérant comme il vient d'être dit, la valeur *particulière* du coefficient de dilatation de l'enveloppe elle-même.

(*) Voici en quoi consiste cette opération : l'enveloppe thermométrique étant remplie à peu près complètement de mercure, on la place dans la glace fondante, et l'on note la division n où s'arrête le mercure. On porte ensuite l'instrument sur la balance, et l'on en fait la tare. On fait alors sortir, en chauffant un peu le réservoir, une quantité de mercure telle que, lorsqu'on replacera l'instrument dans la glace, le niveau s'arrête à une division un peu supérieure au zéro de la graduation; on note cette division n', et, en reportant l'instrument sur la balance, on détermine la diminution de poids p. On connaît ainsi le poids p du mercure qui occupait à zéro $n - n'$ divisions. Enfin, on vide entièrement l'enveloppe, et la nouvelle diminution de poids P exprime le poids du mercure qui, à zéro, remplissait l'instrument jusqu'à la division n', ou dont le volume était $N + n'$ (N étant la capacité du réservoir jusqu'au zéro de la graduation). — Si l'on exprime que les poids P et p de mercure sont entre eux comme les volumes qu'ils occupent à zéro, on a:

$$\frac{N + n'}{n - n'} = \frac{P}{p},$$

d'où l'on tire la valeur de l'inconnue N :

$$N = \frac{P}{p}(n - n') - n'.$$

1° *Détermination du coefficient de dilatation de l'enveloppe.* — On introduit du mercure dans l'enveloppe, de manière que, l'instrument étant plongé dans la glace fondante, le liquide arrive à l'une des divisions inférieures de la tige : soit n le numéro de cette division; $n + N$ est le volume du mercure que contient l'enveloppe à 0°. — On porte ensuite l'appareil à une température connue T (à 100 degrés, par exemple), et on détermine le numéro n_1 de la division à laquelle arrive le mercure; $n_1 - n$ est la *dilatation apparente* de toute la masse du mercure, pour une élévation de température de T degrés. Donc, le *coefficient de dilatation apparente* μ, ou la dilatation apparente de l'unité de volume pour une élévation de température d'un degré, est

$$\mu = \frac{n_1 - n}{(n + N)\,T};$$

en le retranchant du coefficient de dilatation absolue du mercure $\frac{1}{5550}$, on a le coefficient de dilatation de l'enveloppe, savoir

$$k = \frac{1}{1550} - \mu.$$

2° *Détermination du coefficient de dilatation absolue d'un liquide quelconque.* — Dans la même enveloppe thermométrique, on introduit le liquide dont on cherche le coefficient de dilatation absolue, et on lit encore les divisions n' et n'_1 auxquelles arrive le liquide aux températures 0° et T'. Le coefficient de dilatation apparente δ du liquide est

$$\delta = \frac{n'_1 - n'}{(n' + N)\,T'};$$

en y ajoutant le coefficient de dilatation de l'enveloppe k, on a le coefficient de dilatation absolue du liquide,

$$d = \delta + k.$$

Quant aux conditions dans lesquelles on fait cette seconde expérience, il faut remarquer que la température choisie T' n'est généralement pas celle de 100°; c'est une température tantôt supérieure, tantôt inférieure, selon la volatilité du liquide sur lequel on opère. — On place l'instrument dans un bain d'eau ou d'huile, contenu dans une caisse rectangulaire dont une des faces est formée par une glace de verre. La température du bain est donnée par un thermomètre à mercure, placé à côté de l'enveloppe thermométrique qui contient le liquide à étudier : de là, le nom de procédé des *thermomètres comparés*, par lequel on désigne cette disposition expérimentale.

222. Variations du coefficient de dilatation absolue d'un même liquide à diverses températures. — Lorsqu'on détermine les *coefficients*

moyens de dilatation absolue d'un liquide entre 0° et des températures de plus en plus élevées, on trouve des nombres qui vont généralement en croissant, surtout lorsqu'il s'agit de liquides volatils.

Isidore Pierre a déduit, d'un grand nombre d'expériences, les valeurs du *coefficient vrai* de dilatation de divers liquides, soit à la température de 0°, soit à la température d'ébullition de chacun d'eux : c'est-à-dire l'accroissement éprouvé par l'unité du volume, en passant, soit de 0° à 1°, soit de la température d'ébullition à cette même température augmentée de 1 degré. — Voici quelques-uns de ces résultats : on remarquera que, pour un même liquide, les nombres de la seconde colonne sont notablement plus grands que ceux de la première.

COEFFICIENTS DE DILATATION VRAIS

	A ZÉRO.	A LA TEMPÉRATURE D'ÉBULLITION.	TEMPÉRATURES D'ÉBULLITION.
Alcool	0,001 049	0,001 196	78°,3
Éther	0,001 513	0,001 647	35°,5
Aldéhyde	0,001 634	0,001 827	22°,0
Sulfure de carbone	0,001 140	0,001 249	47°,9
Brome	0,001 058	0,001 168	63°,0
Chloroforme	0,001 107	0,001 320	63°,5

223. Coefficients de dilatation des liquides très volatils, à des températures très supérieures à leur point d'ébullition normal. — Lorsqu'on renferme un liquide volatil dans une enveloppe résistante, on peut le porter à une température extrêmement élevée sans que l'ébullition se produise; on peut donc étudier, dans ces conditions, la dilatation du liquide à des températures bien supérieures à celle de son point d'ébullition normal.

Cette étude a été faite par Drion : il a reconnu que le coefficient de dilatation vrai des liquides très volatils va en augmentant très rapidement avec la température, et qu'il peut même atteindre des valeurs égales à deux ou trois fois celle du coefficient de dilatation de l'air. — Voici quelques nombres tirés de ce travail :

COEFFICIENTS DE DILATATION VRAIS :

	à 0°.	à 50°.	à 90°.	à 130°.
Acide hyponazotique	0,001 446	0,002 021	0,003 081	»
Éther chlorhydrique	0,001 485	0,002 045	0,002 910	0,005 031
Acide sulfureux	0,001 754	0,002 558	0,004 147	0,009 751

224. Maximum de densité de l'eau. — Lorsqu'on refroidit simultanément, à partir de 15°, par exemple, un thermomètre à mercure et une enveloppe thermométrique contenant de l'eau, on voit d'abord les liquides baisser à la fois dans les deux instruments; mais, lorsque la température arrive aux environs de 4°, si le niveau du mercure continue à descendre, celui de l'eau remonte. — Il y a donc, aux environs de 4°, une température à laquelle le volume de l'eau passe par un *minimum;* par suite, la densité passe par un *maximum*.

225. Expériences de Despretz. — L'expérience précédente, effectuée avec précision, donne directement la température à laquelle le volume *apparent* de l'eau est un minimum : pour trouver la température qui correspond au minimum de volume *réel*, c'est-à-dire au maximum de

densité, il faut tenir compte de la variation de volume de l'enveloppe. — C'est ce qu'a fait Despretz, en étudiant préalablement, comme il a été dit (221), la dilatation de l'enveloppe employée : c'est ainsi qu'il a pu fixer très approximativement à 4° la température du maximum de densité de l'eau.

Il a pu ensuite, au moyen d'un nombre suffisant de déterminations effectuées entre 0° et 100°, déterminer les valeurs de la densité de l'eau, de degré en degré, dans cet intervalle, en prenant pour unité la densité à 4°. — Voici quelques nombres extraits de ce travail :

TEMPÉRATURES.	DENSITÉ DE L'EAU.	TEMPÉRATURES.	DENSITÉ DE L'EAU.
0°	0,999 873	50°	0,995 688
4°	1,000 000	40°	0,992 329
10°	0,999 731	30°	0,988 093
20°	0,998 213	100°	0,958 634

Enfin, en profitant de cette remarque, que l'on peut abaisser jusque vers — 20° la température d'un thermomètre à eau, bien purgé d'air, sans que le liquide se congèle, Despretz a pu constater que l'accroissement de volume, déjà observé pour des températures décroissantes de 4° à 0°, se poursuit au-dessous de 0°, jusqu'au moment où il devient impossible de maintenir l'eau à l'état liquide.

226. Expérience de Hope. — On constate, dans les Cours, l'existence du maximum de densité de l'eau, au moyen de l'expérience suivante, qui est due au physicien écossais Hope. — Une éprouvette de verre M (*fig.* 169) contient de l'eau : deux thermomètres A et B plongent, l'un dans les couches supérieures du liquide, l'autre dans les couches inférieures; le manchon métallique C, qui entoure la partie moyenne de l'éprouvette, contient de la glace. L'eau de l'éprouvette étant primitivement à 10°, par exemple, on voit bientôt les deux thermomètres indiquer un abaissement de température; mais le thermomètre inférieur baisse d'abord plus vite que le thermomètre supérieur, les couches d'eau refroidies acquérant d'abord une plus grande densité, et gagnant successivement le fond du vase. Lorsque B est arrivé à 4°, *il demeure stationnaire*, tandis que A continue à descendre, d'abord jusqu'à 4°, puis au-dessous de 4°, et jusqu'à zéro. On en conclut que l'eau, à mesure qu'elle se refroidit au-dessous de 4°, au niveau de la galerie C, acquiert des densités moindres et gagne la partie supérieure du vase (*).

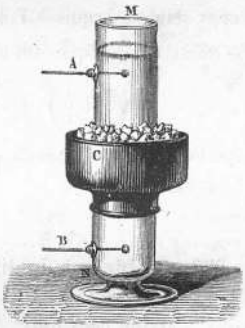


Fig. 169.
Maximum de densité de l'eau.

(*) Cette expérience permet de concevoir comment, dans les lacs, la température de

227. Emploi du thermomètre à poids, pour la détermination du coefficient de dilatation cubique des corps solides. — Le thermomètre à poids, dont nous avons fait usage pour étudier les dilatations des liquides (220), a été appliqué par Dulong et Petit à la détermination directe du coefficient de dilatation cubique de quelques corps solides.

Fig. 170.

On donne au corps la forme d'un petit cylindre, et on l'introduit dans le réservoir, avant de souder à celui-ci le tube qui le surmonte (*fig.* 170) : on remplit l'appareil de mercure (*), et on exécute les mêmes manipulations et les mêmes pesées que précédemment (220). — Pour poser l'équation du problème, nous écrirons que la capacité intérieure de l'enveloppe à T degrés est égale à la somme des volumes du corps solide et du mercure qu'elle contient, à cette température.

Soit π le poids (ou mieux la masse) du corps solide, et Δ sa densité à zéro ; soit P le poids de mercure contenu dans l'appareil à zéro, et p le poids de mercure qui s'en échappe à T degrés. Soit D la densité du mercure à zéro. La capacité intérieure de l'enveloppe à zéro est égale à la somme des volumes du corps solide, $\frac{\pi}{\Delta}$, et du mercure, $\frac{P}{D}$; donc à T degrés, la capacité de l'enveloppe est devenue $\left(\frac{\pi}{\Delta}+\frac{P}{D}\right)(1+kT)$, en désignant par k le coefficient de dilatation cubique du verre. D'autre part, le mercure qui est resté dans l'appareil aurait à 0^0 un volume $\frac{P-p}{D}$; donc, si m est le coefficient de dilatation absolue du mercure, son volume à T degrés est $\frac{P-p}{D}(1+mT)$. Enfin, le corps solide a acquis à T degrés le volume $\frac{\pi}{\Delta}(1+xT)$, x étant son coefficient de dilatation cubique. On aura donc l'équation

$$\left(\frac{\pi}{\Delta}+\frac{P}{D}\right)(1+kT)=\frac{P-p}{D}(1+mT)+\frac{\pi}{\Delta}(1+xT),$$

équation du premier degré, d'où l'on tirera la valeur de x.

III. — DILATATIONS DES GAZ.

228. Coefficient de dilatation d'un gaz, sous pression constante. — Loi de Gay-Lussac. — On appelle *coefficient de dilatation d'un gaz, sous pression constante, le nombre qui exprime l'accroissement éprouvé par l'unité de volume de ce gaz, pour une élévation de température d'un degré.*

l'eau, à partir d'une certaine profondeur, demeure invariablement égale à 4^0, soit pendant les chaleurs de l'été, soit pendant les froids de l'hiver. Les variations de température de la surface, qui se font sentir jusqu'à une certaine distance, donnent toujours à l'eau une densité moindre que celle des parties profondes : il n'y a donc pas de raison pour que la température devienne uniforme dans la masse, par le mélange des diverses couches de liquide.

(*) Dans les expériences de Dulong et Petit, les métaux qui auraient pu être attaqués par le mercure avaient été couverts d'une couche de vernis.

Les expériences de Gay-Lussac, qui seront décrites plus loin, l'amenèrent à énoncer la loi générale suivante : *Tous les gaz ont, entre* 0° *et* 100°, *le même coefficient de dilatation* (loi de Gay-Lussac). — De plus, les expériences de Davy le conduisirent à considérer la valeur de ce coefficient comme *indépendante de la pression* sous laquelle la dilatation se produit.

Nous verrons que cette loi ne doit pas être considérée comme rigoureusement exacte; mais, comme la loi de Mariotte, elle est suffisamment approchée pour permettre de calculer, sans grande erreur, les variations de volume des gaz, pourvu qu'ils soient assez éloignés de leur point de liquéfaction. — C'est ce que nous supposerons dans ce qui va suivre.

229. Formules relatives à la dilatation des gaz sous pression constante. — Si l'on désigne par α le coefficient de dilatation d'un gaz, par V_0, V et V′ les volumes qu'occupe, *sous une pression constante*, celle de 76 centimètres par exemple, une même masse de ce gaz portée successivement aux températures de 0°, t et t' degrés, on a, en raisonnant comme plus haut (208), les relations :

$$(1)\qquad \begin{cases} V = V_0 (1 + \alpha t) \\ V_0 = V \dfrac{1}{1 + \alpha t} \\ V' = V \dfrac{1 + \alpha t'}{1 + \alpha t} \end{cases}$$

Ces formules supposent que la pression du gaz n'a pas varié. — Supposons maintenant que la pression varie en même temps que la température : si l'on admet que le coefficient de dilatation α soit indépendant de la pression (228), on aura tous les éléments nécessaires pour résoudre le problème suivant :

230. Problème général. — *Étant donné le volume* V *d'une masse gazeuse, à la température* t *et sous la pression* H, *trouver le volume* V′ *de la même masse à la température* t′ *et sous la pression H′.* — Supposons d'abord que la pression seule varie, et désignons par V_1 le volume qu'occuperait le gaz à t degrés et sous la pression H′; on aura, d'après la loi de Mariotte :

$$V_1 = V \frac{H}{H'}.$$

En faisant varier maintenant la température, on aura

$$V' = V_1 \frac{1 + \alpha t'}{1 + \alpha t},$$

ou, en remplaçant V_1 par sa valeur,

$$V' = V \times \frac{H}{H'} \times \frac{1 + \alpha t'}{1 + \alpha t}.$$

équation qui peut s'écrire sous la forme plus symétrique :

$$\frac{V'H'}{1+\alpha t'} = \frac{VH}{1+\alpha t}. \tag{2}$$

La formule (2) est connue sous le nom de formule de Gay-Lussac (*).

Remarque. — Ce résultat conduit immédiatement à la solution de la question suivante : *Étant donnée la densité* D *d'un gaz à la température* t *et sous la pression* H, *trouver la densité* D′ *à la température* t′ *et sous la pression* H′. — En effet, les densités d'une même masse de gaz étant en raison inverse des volumes qu'elle acquiert, on aura :

$$\frac{D'}{D} = \frac{V}{V'};$$

mais la formule (2) donne

$$\frac{V}{V'} = \frac{H'}{H} \times \frac{1+\alpha t}{1+\alpha t'}.$$

En substituant, il vient

$$D' \frac{1+\alpha t'}{H'} = D \frac{1+\alpha t}{H} \tag{3}$$

231. Évaluation du volume ou de la densité d'une masse gazeuse, dans les conditions normales de température et de pression. — L'un des problèmes que l'on a le plus fréquemment à résoudre est celui où, connaissant le volume V ou la densité D d'une masse gazeuse à une température t et sous une pression H, on cherche le volume V_0 ou la densité D_0 *dans les conditions normales de température et de pression*, c'est-à-dire à 0° et sous la pression de 76 centimètres. — Dans les formules (2) et (3), il suffit de faire $t' = 0$ et $H' = 76$; il vient alors :

$$\begin{cases} V_0 = V \dfrac{H}{76} \dfrac{1}{1+\alpha t}, \\ D_0 = D \dfrac{76}{H} (1+\alpha t). \end{cases} \tag{4}$$

232. Détermination du coefficient de dilatation des gaz. — Expériences de Gay-Lussac. — Le gaz, préalablement desséché, est introduit dans un réservoir de verre muni d'une tige AB (*fig.* 171). Une petite colonne de mercure *mn* le sépare de l'atmosphère extérieure (**).

(*) On peut considérer l'une ou l'autre de ces deux expressions égales comme représentant la force élastique de la masse gazeuse sous l'unité de volume à la température 0°; ou bien encore le volume occupé par la masse gazeuse à 0° quand sa force élastique est égale à l'unité.

(**) Pour introduire dans l'appareil de l'air desséché, on commençait par emplir de mercure le réservoir A et la tige, en opérant comme pour la construction du thermomètre : on adaptait ensuite à l'extrémité de la tige un tube plus large CC′, contenant des fragments de chlorure de calcium, et l'on renversait l'appareil, comme

La tige a été partagée en parties d'égales capacités, et l'on a déterminé, par une expérience préliminaire, le rapport entre la capacité du réservoir jusqu'au zéro de la division, et celle d'une division de la tige (*). — L'appareil étant placé horizontalement dans une caisse métallique DD', on le porte successivement aux tempéra-

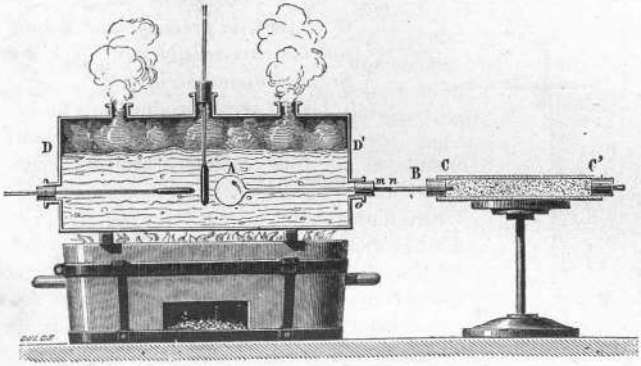


Fig. 171. — Dilatation des gaz; appareil de Gay-Lussac.

Fig. 172

tures de la glace fondante et de la vapeur d'eau bouillante; à chacune de ces deux températures, on note la position de l'index de mercure. — Désignons par V_0 le nombre de divisions occupées par le gaz à 0° (y compris celles que représente la capacité du réservoir); soit V son volume apparent, ou le nombre de divisions qu'il occupe à la température T de la vapeur d'eau bouillante, et k le coefficient de dilatation cubique du verre. Le volume réel du gaz à la température T est $V(1 + kT)$; par suite, le coefficient de dilatation α du gaz est :

$$\alpha = \frac{V(1 + kT) - V_0}{V_0 T}.$$

Gay-Lussac a trouvé, pour l'air et pour les divers gaz qu'il a étudiés, le nombre 0,00575.

Mais deux causes d'erreur principales doivent être signalées dans des expériences de Gay-Lussac : 1° l'imparfaite dessiccation du gaz; 2° l'insuffisance de l'index mercuriel, pour séparer le gaz de l'atmosphère extérieure : on peut s'assurer, en effet, que si, après avoir porté l'appareil à la température de l'eau bouillante, on le ramène à 0°, l'index

l'indique la figure 172: alors, à l'aide d'un fil de platine qu'on introduisait dans le tube capillaire, on déterminait la sortie du mercure, qui se trouvait ainsi remplacé par de l'air desséché. Avec quelques précautions, on parvenait à n'avoir plus dans le tube que la petite colonne de mercure qui devait servir d'index.

(*) Voir la note de la page 170.

de mercure, au lieu de revenir simplement à son point de départ, revient en un point plus rapproché du réservoir, d'où l'on conclut qu'une partie du gaz s'est échappée. — Il était donc nécessaire de reprendre ces déterminations, par des méthodes plus précises.

233. Expériences de Regnault. — Parmi les expériences de Regnault, nous choisirons celles qui ont porté sur les dilatations des gaz entre 0° et 100°, *la pression étant maintenue toujours sensiblement égale à la pression atmosphérique.*

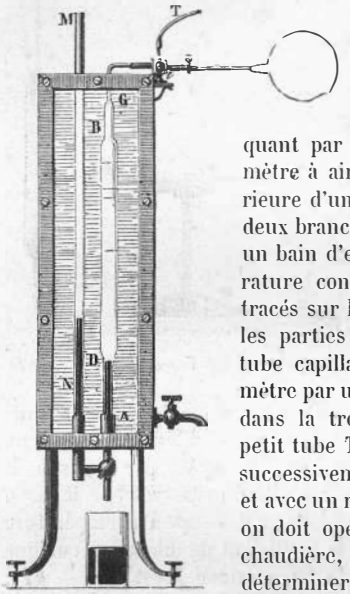


Fig. 175.
Appareil de Regnault.

Le gaz sera introduit dans un ballon de verre (*fig.* 175), communiquant par un tube capillaire avec un manomètre à air libre GANM, muni à sa partie inférieure d'un robinet à trois voies (*fig.* 122); les deux branches du manomètre sont placées dans un bain d'eau, qui les maintient à une température constante. Deux points de repère sont tracés sur le verre, l'un en B, l'autre en D, sur les parties étroites du tube manométrique. Le tube capillaire du ballon est réuni au manomètre par un tube métallique à trois branches; dans la troisième branche, est mastiqué un petit tube T, qui sera mis en communication successivement avec une machine pneumatique et avec un réservoir contenant le gaz sur lequel on doit opérer. Le ballon est placé dans une chaudière, disposée comme l'étuve qui sert à déterminer le centième degré du thermomètre (*fig.* 165) (*). — Pour avoir dans l'appareil du gaz parfaitement sec, on introduit d'abord un peu de mercure dans le manomètre, et l'on tourne le robinet inférieur de manière à intercepter la communication entre les deux branches. On chauffe alors le ballon, afin de vaporiser l'humidité adhérente au verre; on fait le vide dans l'appareil, et on laisse entrer du gaz, qui se dessèche en traversant des tubes à ponce sulfurique; on fait encore le vide, on laisse entrer une nouvelle quantité de gaz, et ainsi de suite, une douzaine de fois, de manière à être certain que l'appareil ne contient plus trace d'humidité.

L'appareil ayant été rempli une dernière fois de gaz sec, on entoure le ballon de glace fondante : on rétablit la communication entre les

(*) Le degré de température étant défini par la dilatation de l'air (205), on ne doit pas se servir d'un thermomètre dans les expériences destinées à déterminer le coefficient de dilatation de l'air; il est donc nécessaire d'étudier la dilatation du gaz entre les températures des deux *points fixes*, 0° et 100°, températures indépendantes de la nature du corps thermométrique.

deux branches du manomètre, en plaçant le robinet R dans la position 1 (*fig.* 122), et l'on verse du mercure en M, de manière à amener le niveau dans l'autre branche au trait supérieur B; le liquide s'élève alors à la même hauteur de part et d'autre. On ferme à la lampe le tube de verre T. On note la hauteur H du baromètre et la température extérieure t. — C'est la première partie de l'opération.

On remplace la glace fondante par de l'eau qu'on porte à l'ébullition Une partie du gaz passe dans le manomètre, en même temps que le niveau du mercure s'élève à gauche, par suite de l'augmentation de force élastique. On fait alors écouler du mercure par le robinet R, en le tournant dans la position 2 (*fig.* 122), afin de diminuer la pression : les dimensions du ballon et la capacité BD ont été choisies de façon que le niveau du mercure arrive au trait inférieur D lorsque les deux colonnes mercurielles n'offrent plus qu'une différence de hauteur de quelques millimètres. On ramène le robinet dans la position 1, et l'on détermine la force élastique H′ du gaz, laquelle est exprimée par la hauteur barométrique, augmentée ou diminuée de la petite différence de hauteur du mercure dans les deux branches; on note la température extérieure t', et la température 0 de l'eau qui entoure le manomètre. — C'est la seconde partie de l'opération.

Soit V_0 le volume du ballon à 0°, jaugé à l'eau distillée; v le volume du tube capillaire et de la partie supérieure du tube manométrique, jusqu'au trait supérieur B, volume jaugé au mercure, à la température extérieure; u le volume de la partie comprise entre les traits B et D, jaugé au mercure, à la température du bain qui l'entoure. — Nous allons calculer le volume total du gaz, ramené à 0° et à la pression de 76 centimètres : ce volume peut s'exprimer soit au moyen des données fournies par la première partie de l'opération, soit au moyen des données fournies par la seconde partie; en égalant les deux expressions, nous obtiendrons une équation d'où nous pourrons tirer α.

Dans la première partie de l'opération, l'air occupait, sous la pression H, d'une part, le volume V_0 du ballon à 0°; d'autre part, le volume v du tube à la température t : en ramenant chacun de ces deux volumes de gaz à 0° et 76 centimètres, et appliquant les lois de Mariotte et de Gay-Lussac, applicables pour de petites variations de pression et de température, on a, pour le volume total,

$$\left(V_0 + \frac{v}{1 + \alpha t}\right)\frac{H}{76}.$$

Dans la seconde partie de l'opération, le ballon étant à T degrés (*), son volume est $V_0(1 + kT)$, k étant le coefficient de dilatation cubique du verre. Le gaz occupe donc, d'une part, le volume $V_0(1 + kT)$ à la

(*) Cette température T ne diffère jamais beaucoup de 100°. On la détermine exactement d'après la hauteur barométrique (Note de la page 154).

température T; d'autre part, le volume v à la température t', et le volume u à la température 0; comme il est à une pression H′, voisine de la pression atmosphérique, on obtient, pour seconde expression du volume total, à 0° et 76 centimètres,

$$\left(\frac{V_0(1+kT)}{1+\alpha T}+\frac{v}{1+\alpha t'}+\frac{u}{1+\alpha 0}\right)\frac{H'}{76}.$$

En égalant ces deux expressions, il vient

$$\left(V_0+\frac{v}{1+\alpha t}\right)H=\left(\frac{V_0(1+kT)}{1+\alpha T}+\frac{v}{1+\alpha t'}+\frac{u}{1+\alpha 0}\right)H'.$$

En chassant les dénominateurs, on obtient une équation qui est d'un degré trop élevé en α pour qu'on puisse la résoudre directement. Pour en déduire la valeur de α, Regnault employait une méthode de calcul particulière, que nous ne pouvons indiquer ici. Nous nous contenterons de faire remarquer que, si la température extérieure n'a pas varié pendant l'expérience, et si cette température est aussi celle de l'eau qui entoure le manomètre, on aura $t = t' = 0$; si l'on a, en même temps H′ = H, l'équation devient

$$V_0=\frac{V_0(1+kT)}{1+\alpha T}+\frac{u}{1+\alpha t},$$

équation d'où il est facile de tirer la valeur de α.

Pour l'air en particulier, le calcul exact, appliqué aux données de l'expérience, a donné pour le coefficient de dilatation α la valeur 0,00367 qui a été adoptée par les physiciens. — On emploie souvent, dans les calculs, la valeur égale $\frac{1}{273}$.

234. Valeurs des coefficients de dilatation des divers gaz, sous pression constante. — Le tableau suivant donne, pour quelques gaz, és résultats fournis par les expériences de Regnault, sous une pression sensiblement égale à la pression atmosphérique.

	COEFFICIENTS DE DILATATION.
Hydrogène	0,003 661
Air	0,003 670
Oxyde de carbone	0,003 669
Acide carbonique	0,003 710
Protoxyde d'azote	0,003 719
Cyanogène	0,003 877
Acide sulfureux	0,003 903

On voit que les trois premiers gaz ont des coefficients de dilatation sensiblement égaux. — Pour les autres gaz, le coefficient de dilatation a des valeurs d'autant plus grandes, qu'il s'agit d'un gaz plus voisin de son point de liquéfaction.

A la suite de ces expériences, Regnault en a fait d'autres, pour étu-

dier les dilatations des gaz sous des pressions *supérieures à la pression atmosphérique*, la pression conservant d'ailleurs toujours sensiblement une même valeur pendant la durée d'une même expérience. — Il a trouvé que, pour l'hydrogène ou l'air, le coefficient de dilatation reste sensiblement indépendant de la pression. — Pour les gaz facilement liquéfiables, comme l'acide carbonique ou l'acide sulfureux, le coefficient de dilatation augmente notablement, à mesure que la pression sous laquelle on opère est plus considérable.

En résumé, les recherches de Regnault conduisent à conclure, ainsi que nous l'avons indiqué en commençant, que la loi de Gay-Lussac, même avec l'extension indiquée par les expériences de Davy (228), peut être appliquée, sans erreur sensible, au calcul des variations de volume des gaz, mais seulement quand il s'agit de gaz suffisamment éloignés de leur point de liquéfaction.

CHAPITRE III

DENSITÉS DES GAZ

235. Définitions. — D'après la définition générale (98), on doit appeler *densité absolue* d'un gaz, dans des conditions déterminées de température et de pression, par exemple dans les conditions normales (température 0°, pression de 76^{cm}), la masse de l'unité de volume de ce gaz, pris dans ces conditions.

Pour obtenir expérimentalement les densités absolues des gaz, la méthode qui se présente d'abord consisterait à déterminer pour chacun d'eux, comme on l'a fait pour les corps solides ou liquides, la *densité relative* ou le *poids spécifique relatif*, par rapport à l'eau, c'est-à-dire le rapport du poids d'un volume déterminé du gaz pris dans les conditions normales, au poids du même volume d'eau pris à 4° : le produit de ce rapport par la masse m de l'unité de volume d'eau à 4° donnerait la densité absolue d_0 du gaz, dans ces conditions. — On voit même que, dans le système d'unités C.G.S., la masse du centimètre cube d'eau étant prise pour unité, la densité absolue d'un gaz est exprimée par le nombre même qui exprime le poids spécifique relatif.

Mais cette détermination directe des poids spécifiques des divers gaz comprendrait une série d'opérations délicates, particulièrement en raison de la difficulté d'obtenir, avec la précision nécessaire, le poids d'un volume d'eau égal à celui du gaz employé. — Dans la méthode que nous allons décrire, on n'effectue cette détermination directe que pour un seul gaz, l'air : soit a le poids spécifique de l'air. Pour chacun des autres gaz, on détermine par l'expérience le rapport des poids de volumes égaux de gaz et d'air, pris l'un et l'autre dans les conditions normales ; il suffira de faire le produit du poids spécifique de l'air par ce rapport, pour avoir le poids spécifique relatif du gaz par rapport à l'eau

Nous appellerons *densité d'un gaz* (densité par rapport à l'air) le rapport des poids de volumes égaux de ce gaz et d'air, pris l'un et l'autre à 0° et sous la pression de 76 centimètres (*).

(*) Nous ferons remarquer que, s'il s'agit d'un gaz auquel la loi de Mariotte soit applicable aussi bien qu'à l'air, et si le coefficient de dilatation de ce gaz est le même que celui de l'air, ce rapport est *indépendant des conditions de température et de*

236. Détermination des densités des gaz; méthode de Regnault. — La méthode employée par Regnault consiste essentiellement dans les deux opérations suivantes : — 1° détermination du poids de gaz qui remplit, à 0° et sous une pression voisine de 76^{cm}, un ballon de verre d'une grande capacité; on en déduit, au moyen de la loi de Mariotte, le poids du gaz qui remplirait le ballon à 0° et sous la pression de 76^{cm}; — 2° détermination, par une seconde expérience, du poids d'air qui remplit le même ballon, dans des conditions semblables : on en déduit le poids de l'air qui le remplirait à 0° et 76^{cm}. — Voici comment on effectue ces deux déterminations.

1° Le ballon A (*fig.* 174), qui doit servir aux expériences, est fermé à sa partie supérieure par une monture à robinet R : le ballon étant chauffé, on le met en communication, par le tube à trois branches T, d'une part avec la machine pneumatique; d'autre part, par l'intermédiaire de tubes desséchants, avec l'appareil producteur du gaz. Des robinets, qui ne sont pas représentés sur la figure, permettent d'intercepter ou de rétablir à volonté ces communications. — Après avoir fait le vide dans le ballon, on laisse entrer le gaz sur lequel doit porter l'expérience; on fait le vide de nouveau, et l'on recommence cinq ou six fois la même manipulation. Enfin, on place le ballon dans la glace fondante; et après la dernière rentrée de gaz, on le laisse quelques instants en communication avec l'atmosphère, puis on ferme le robinet R : on observe la hauteur barométrique H. — On retire le ballon de la glace, on l'essuie, et on le laisse reprendre la température du laboratoire; on le suspend sous l'un des plateaux de la balance, et l'on en fait la tare, comme nous l'indiquerons plus loin.

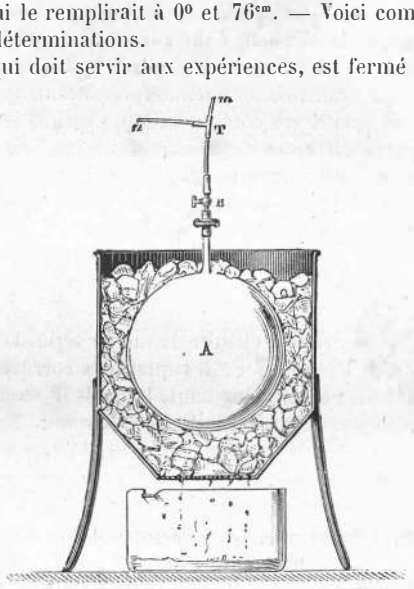


Fig. 174.

pression, pourvu que ces conditions restent les mêmes pour le gaz et pour l'air. — Mais il n'en serait plus de même pour un gaz comme l'acide carbonique, qui est notablement plus compressible que l'air (157) et dont le coefficient de dilatation est sensiblement plus grand. — C'est pourquoi, pour définir avec précision la densité du gaz, il est nécessaire de spécifier les *conditions particulières* de température et de pression, dans lesquelles le gaz et l'air sont supposés placés.

Il est clair que, si l'on pouvait maintenant extraire complètement le gaz, la perte de poids que le ballon éprouverait donnerait le poids de gaz qui le remplit à 0° et sous la pression H. Mais la machine pneumatique ne peut faire un vide absolu : on a recours alors au procédé suivant, qui conduit à un résultat équivalent.

On replace le ballon dans la glace, et, au moyen du tube T, on le remet en communication, d'une part avec la machine pneumatique, d'autre part avec un manomètre barométrique comme celui de la figure 123. On fait le vide autant que possible, et on lit, sur le manomètre, la tension ε du gaz restant. On ferme enfin le robinet R, on détache les tubes, et on replace le ballon sous le plateau de la balance, après avoir pris les mêmes précautions que plus haut. Le poids p, qu'il faut ajouter du côté du ballon, exprime le poids de gaz qui a été enlevé par la machine, c'est-à-dire celui qui occuperait le volume du ballon à 0° et sous la pression $H - \varepsilon$ (147) ; on en déduit, en appliquant la loi de Mariotte, le poids P de gaz qui remplirait le même volume à 0° et sous la pression de 76^{cm}, savoir :

$$P = p\frac{76}{H - \varepsilon}. \qquad (1)$$

2° On répète ensuite la même série d'expériences avec de l'air sec : soient P′, p', H′, ε', les quantités correspondantes à P, p, H, ε ; on en déduit, comme plus haut, le poids P′ de l'air qui emplirait le ballon à 0° et sous la pression de 76^{cm}, savoir :

$$P' = p'\frac{76}{H' - \varepsilon'}. \qquad (2)$$

En divisant membre à membre les égalités (1) et (2), et observant que le quotient $\frac{P}{P'}$ est précisément la densité cherchée D, on a

$$D = \frac{p}{p'}\times\frac{H' - \varepsilon'}{H - \varepsilon}$$

237. Emploi d'une tare compensée. — Dans l'exposé qui précède, nous n'avons pas tenu compte de la poussée qu'éprouve le ballon, de la part de l'air extérieur, poussée qui dépend des conditions de pression, de température et d'humidité de cet air. Si ces conditions restaient les mêmes lors des deux pesées du ballon plein de gaz et du ballon vide, le poids p exprimerait toujours le poids du gaz enlevé par la machine, comme si la poussée n'existait pas. Mais la durée de chaque expérience étant toujours d'un grand nombre d'heures, en raison surtout de la nécessité de laisser s'établir l'équilibre de température dans le ballon, les conditions atmosphériques se seront généralement modifiées : il faudrait donc, pour obtenir le poids du gaz

enlevé par la machine, faire subir au poids p une correction. Une correction du même genre devrait être faite sur le poids p'. Ces corrections présentent toujours une certaine incertitude, qui peut entraîner des erreurs correspondantes dans les résultats.

La méthode adoptée par Regnault a l'avantage d'éviter les corrections, en établissant la tare du ballon à l'aide d'un second ballon A′ (*fig.* 175), fabriqué avec le même verre, et présentant *exactement* le même volume extérieur (*). On introduit, dans ce ballon-tare, un poids de mercure tel que, lorsque les deux ballons pleins d'air sont accrochés sous les plateaux de la balance, il faille, pour établir l'équilibre, ajouter une vingtaine de grammes du côté du ballon à robinet.

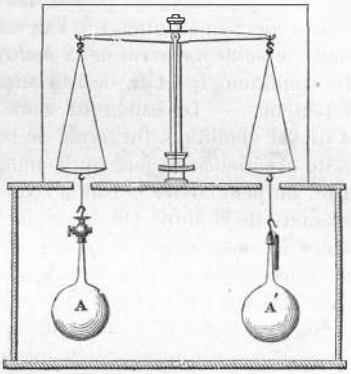


Fig. 175.

La cage de la balance est placée au-dessus d'une armoire vitrée, dont l'air est desséché par de la chaux vive; c'est dans l'atmosphère de cette armoire que sont suspendus les ballons. — Les deux ballons A et A′ éprouvent toujours des poussées égales, quels que soient les changements qui puissent survenir dans la température et dans la pression de l'air environnant. De plus, comme ils sont formés du même verre, l'eau qui se condense à leur surface, en vertu de la propriété hygrométrique du verre, peut être considérée comme étant en égale quantité sur chacun d'eux. — L'expérience montre d'ailleurs que l'équilibre, une fois établi, persiste indéfiniment.

238. Poids spécifique de l'air. — Il nous reste à montrer comment on détermine le poids spécifique relatif de l'air, pris à 0° et sous la pression normale, par rapport à l'eau, prise à 4°.

Les expériences qui précèdent font déjà connaître le poids P′ de l'air qui remplirait le ballon A (*fig.* 174) à 0° et sous la pression de 76^{cm}, savoir :

$$P' = p' \frac{76}{H' - \varepsilon'}.$$

(*) Pour obtenir deux ballons de même volume extérieur, on commence par les choisir de volumes peu différents; on prend le plus grand des deux pour le ballon A qui doit recevoir le gaz; au plus petit ballon A′ on adapte une simple virole métallique, terminée par un crochet. On les emplit d'eau et on détermine exactement leurs volumes extérieurs, par la perte de poids qu'ils éprouvent quand on les plonge dans l'eau : supposons que l'on trouve, entre les volumes, une différence de 25 centimètres cubes; pour achever la compensation, on façonne à la lampe un tube de verre fermé

Le poids P′ étant évalué en grammes, si on connaissait le volume V_0 du ballon en centimètres cubes, le même nombre V_0 exprimerait en grammes le poids d'un égal volume d'eau à la température 4°; et le quotient $\frac{P'}{V_0} = a$ serait le poids spécifique relatif de l'air que l'on veut déterminer.

Pour mesurer V_0 on pèse d'abord le ballon *ouvert*, c'est-à-dire contenant de l'air identique à l'air extérieur : le poids obtenu π_1 représente le *poids apparent* de la *matière* du ballon avec sa monture, dans les conditions t_1, et H_1 de l'air ambiant, au moment de cette première expérience. — Le ballon est alors rempli, à 0°, d'eau distillée purgée d'air par ébullition. On ferme le robinet, et comme on a choisi pour cette expérience un jour où la température extérieure t_2 est inférieure à 8°, on peut laisser le ballon reprendre la température ambiante, sans craindre de rupture. On détermine son poids π_2. Le nombre π_2 représente la somme du *poids apparent* de la matière du ballon, avec sa monture, et du *poids apparent* de l'eau, dans les conditions t_2 et H_2 de l'air ambiant au moment de cette seconde expérience. — La différence $\pi_2 - \pi_1$ exprime le *poids apparent* de l'eau, dans les conditions t_2 et H_2, en négligeant seulement la petite *variation de poussée* qu'a pu éprouver la matière du ballon et de sa monture, en passant des conditions t_1 et H_1 aux conditions t_2 et H_2. — On a donc, en désignant par Q le poids réel de l'eau qui occupe à 0° le volume V_0, et par P_2 le poids du même volume d'air à la température t_2 et sous la pression H_2 :

$$\pi_2 - \pi_1 = Q - P_2. \tag{1}$$

Pour calculer P_2, il suffit des données de l'une des expériences effectuées avec le ballon plein d'air sec à 0° (256) : en effet, p' étant le poids d'air qui remplit le volume V_0 à 0° et sous la pression $H' - \varepsilon'$, on a

$$P_2 = p' \frac{H_2}{H' - \varepsilon'} \times \frac{1}{1 + \alpha t_2}.$$

En tirant, de l'équation (1), la valeur du poids de l'eau Q, évaluée en grammes, et divisant par e_0 la densité connue de l'eau à 0° (225), on a le volume V_0 du ballon en centimètres cubes.

$$V_0 = \frac{\pi_2 - \pi_1 + P_2}{e_0}.$$

En faisant le quotient de P′ par V_0, on trouve $a = 0{,}0012\mathfrak{95}$.

La masse de 1^{cc} d'air à 0° sous la pression normale est donc de

aux deux bouts, de manière qu'il éprouve dans l'eau une perte de poids de 25 grammes : ce tube, suspendu à la virole du ballon A′ comme le montre la figure 175, formera avec lui un volume total égal à celui du ballon A.

$0^{gr},001293$. — La masse du litre d'air est, par suite, $1^{gr},293$. On prend souvent dans les calculs la valeur approchée $1^{gr},3$ (*).

239. Calcul du poids d'un volume déterminé de gaz, dans des conditions données de température et de pression. — Soit D la densité d'un gaz par rapport à l'air; proposons-nous de calculer le poids (ou mieux la masse) P, en grammes, d'un volume V de ce gaz, exprimé en centimètres cubes, à t degrés, et sous la pression H.

Le volume occupé par ce gaz, à 0° et sous la pression de 76^{cm}, serait (231) :

$$V_0 = V \frac{H}{76} \times \frac{1}{1 + \alpha t}.$$

D'autre part, à 0° et sous la pression de 76^{cm}, la masse du centimètre cube de gaz (235) est égale à $0^{gr},001293 \times D$; et par suite la masse (vulgairement le poids) du gaz sera donnée par l'expression

$$P = V \times 0,001293 \frac{H}{76} \frac{D}{1 + \alpha t}.$$

Si le volume V était exprimé en litres, et si l'on voulait obtenir P en grammes, on remplacerait dans la formule le poids du centimètre cube d'air par le poids du litre d'air $1^{gr},293$.

240. Détermination des densités des gaz qui attaquent les métaux. — La méthode que nous avons exposée (236) ne peut s'appliquer à des gaz capables d'attaquer les garnitures métalliques des ballons. Voici comment on peut opérer, pour le chlore, par exemple :

Fig. 176.

On prend un flacon de verre, de 1 à 2 litres de capacité (*fig.* 176), se fermant avec un bouchon à l'émeri. Ce flacon étant entouré de glace fondante, on l'emplit de chlore sec, en suivant le procédé qu'on indique en chimie : on place le bouchon, et l'on note la pression H de l'atmosphère. On laisse reprendre au flacon la température du laboratoire, on l'essuie, et l'on en fait la tare au moyen d'un autre vase ayant approximativement le même volume extérieur. — On le reporte dans la glace et l'on chasse le chlore par un courant d'air sec : on le bouche, et l'on note la pression H′. Le flacon étant replacé sur la balance, on trouve qu'il faut, pour rétablir l'équilibre avec la même tare, ajouter un poids π à côté du flacon. Si l'on représente par p le poids de chlore que contenait le flacon à 0° et sous la pression H, par p' le poids d'air qu'il contenait à 0° et sous la pression H′, on a :

$$p = p' + \pi.$$

(*) Le poids du mètre cube d'air, dans les circonstances normales, est $1^{kg},293$; par suite, dans le système des unités de la Mécanique, le poids spécifique absolu de l'air est 1,293.

Or, si l'on a préalablement déterminé le volume V_0 du flacon à 0°, le poids p' de l'air qu'il contenait pendant la pesée est égal à $V_0 \times 0^{gr},00\,1293 \times \frac{H'}{76}$. En ajoutant π à l'expression ainsi calculée, on connaît le poids p de chlore sur lequel on a opéré. — On en déduit le poids P de chlore qui remplirait le flacon à 0° et sous la pression de 76 centimètres, savoir :

$$P = p \times \frac{76}{H}.$$

Pour obtenir la densité du gaz, il suffira de diviser P par le poids du même volume d'air, savoir $V_0 \times 0^{gr},00\,1293$.

Nous avons supposé connu le volume V_0 du flacon : pour obtenir ce volume, on détermine par l'expérience l'excès π_1 du poids du flacon plein d'eau à 0°, sur le poids du flacon plein d'air à 0° et sous la pression H'. Le poids de l'eau étant représenté par $V_0 \times 0^{gr},999873$ et celui de l'air par $V_0 \times 0^{gr},00\,1293 \times \frac{H'}{76}$, on aura :

$$\pi_1 = V_0 \left(0^{gr},999873 - 0^{gr},00\,1293 \times \frac{H'}{76} \right),$$

équation dont on déduira la valeur de V_0.

241. Résultats. — Le tableau suivant donne les densités d'un certain nombre de gaz par rapport à l'air; la plupart de ces nombres ont été déterminés par Regnault.

	DENSITÉS par rapport à l'air.
Air	1,0000
Hydrogène	0,0693
Azote	0,9714
Oxygène	1,1056
Chlore	2,47
Cyanogène	1,806
Acide sulfureux	2,250
Acide carbonique	1,529
Oxyde de carbone	0,968
Protoxyde d'azote	1,527
Bioxyde d'azote	1,039

CHAPITRE IV

APPLICATIONS DES DILATATIONS

I. — APPLICATIONS DES DILATATIONS DES CORPS SOLIDES

242. Corrections des mesures linéaires. — Supposons qu'une règle ait été divisée en millimètres, à la température de 0°. Si l'on fait usage de cette règle pour mesurer une longueur, et si la température t est notablement différente, chaque division aura pris une longueur de $1 + lt$ millimètres, en désignant par l le coefficient de dilatation linéaire de la règle. Si donc la lecture faite sur la règle donne un nombre n de divisions, la valeur L de la longueur mesurée sera

$$L = n(1 + lt).$$

243. Pendules compensateurs. — Si l'on veut éviter que les variations de température viennent, en modifiant la longueur du balancier d'une horloge, faire avancer ou retarder l'horloge, il faut faire usage de balanciers spéciaux, qu'on désigne sous le nom de *pendules compensateurs*.

Les balanciers se terminent ordinairement par une lentille, dont la masse l'emporte de beaucoup sur celle du reste de la partie oscillante. La *longueur* du pendule simple, qui ferait son oscillation dans le même temps, diffère alors peu de la distance du point de suspension au centre de gravité de la lentille; c'est cette distance que l'on cherche à rendre indépendante de la température, comme on va le voir.

244 Pendule de Leroy, ou à gril. — Les figures 177 et 178 représentent le système compensateur le plus fréquemment employé. Il est dû à l'horloger Julien Leroy. — La lentille pesante C est reliée au point de suspension par une série de tiges verticales, alternativement en fer et en laiton. En examinant la figure 178, où les tiges de laiton se distinguent des tiges de fer par des hachures transversales, on voit que la dilatation de toutes les tiges de fer tend à abaisser le centre de la lentille, et que la dilatation des tiges de laiton tend à le relever. Or, le laiton étant plus dilatable que le fer, il est possible de régler les longueurs relatives des deux systèmes de tiges de manière qu'il y ait com-

pensation entre leurs allongements. — La longueur totale du fer à 0° étant $a + a' + a'' + a'''$, l'allongement qu'il éprouve en passant de 0° à t degrés est, en désignant par f le coefficient de dilatation linéaire du fer, $(a + a' + a'' + a''')\,ft$. De même $b + b'$ étant la longueur totale du laiton à 0°, et l son coefficient de dilatation, l'allongement correspondant est $(b + b')\,lt$. Pour qu'il y ait compensation à t degrés, il faut et il suffit qu'on ait $(a + a' + a'' + a''')\,ft = (b + b')\,lt$, c'est-à-dire

$$\frac{a + a' + a'' + a'''}{b + b'} = \frac{l}{f},$$

Cette condition est toujours réalisable. On voit, en outre, que la com-

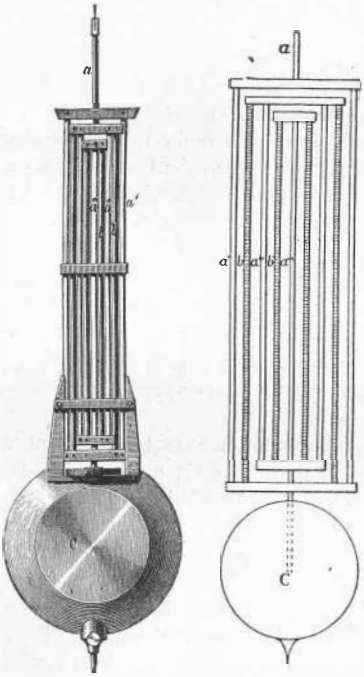


Fig. 177 et 178. — Pendule à gril.

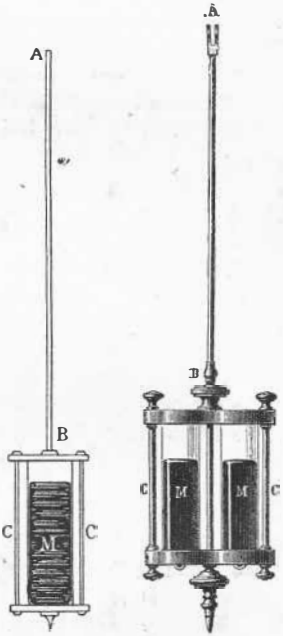


Fig. 179 et 180. — Pendule de Graham.

pensation, une fois réalisée pour une température particulière, subsiste à toute autre température. — Pour le fer et le laiton, le rapport $\frac{l}{f}$ est égal à 1,5 environ.

245. Pendule de Graham. — Le pendule compensateur le plus ancien,

celui qu'on s'accorde à regarder aujourd'hui encore comme le meilleur, a été imaginé par l'horloger anglais Graham.

Il est composé d'une tige d'acier AB (*fig.* 179), terminée à sa partie inférieure par un étrier CC, qui supporte un cylindre de verre M contenant du mercure. Lorsque la température s'élève, le centre de gravité du pendule tend à s'abaisser par la dilatation de la tige; mais, en même temps, le centre de gravité tend à remonter par la dilatation du mercure : le calcul montre que la compensation est possible, et que, une fois réalisée pour une température particulière, elle l'est également pour toute autre (*).

On dispose souvent le pendule de Graham comme le représente la figure 180, en répartissant le mercure dans deux éprouvettes M, M, placées symétriquement de part et d'autre du prolongement de la tige AB.

246. Thermomètre de Bréguet. — Soient deux lames de métaux différents, de zinc et de cuivre, par exemple, appliquées l'une sur l'autre et soudées ensemble. Si l'on vient à chauffer ce système, le zinc s'allongeant plus que le cuivre, la double lame se courbe, de manière que le zinc soit à l'extérieur et le cuivre à l'intérieur de la concavité. Si le système a reçu d'avance une certaine courbure, une élévation de température tend à rendre la courbure plus prononcée.

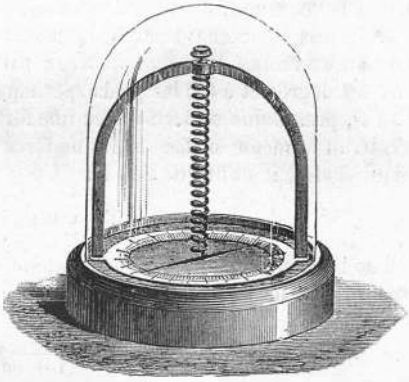


Fig. 181.
Thermomètre métallique de Bréguet.

C'est sur ces remarques que Bréguet a fondé la construction d'un thermomètre métallique d'une extrême sensibilité (*fig.* 181). — Trois petites lames d'argent, d'or et de platine, ayant été superposées dans l'ordre où nous venons de les énumérer, et soudées ensemble, on les a passées au laminoir, de manière à en faire un ruban très long et très mince. On a enroulé ce ruban en hélice; on l'a suspendu par l'une de ses extrémités, et l'on a attaché à l'autre extrémité une aiguille très légère, qui peut se mouvoir sur un cercle divisé. — Supposons que le métal le plus dilatable, l'argent, soit placé à l'extérieur. Si la température s'élève, chacune des portions de spire de l'hélice tend à se courber davantage; l'aiguille marche dans le sens de ce mouvement, en parcourant un angle proportionnel à la somme des déplacements des divers points de l'hélice, estimés parallèlement au plan du cercle divisé.

(*) Voir la démonstration, dans les problèmes qui sont à la fin du volume.

II. — APPLICATIONS DES DILATATIONS DES LIQUIDES.

247. Réduction des hauteurs barométriques à la température 0°. — Lorsque l'on considère les pressions atmosphériques comme mesurées par les hauteurs des colonnes barométriques (119), on suppose la densité du mercure constante; en réalité, la densité change avec la température. On est convenu, pour rendre les résultats comparables entre eux, de considérer toujours, non pas la hauteur barométrique observée, mais *la hauteur d'une colonne de mercure à 0° qui exercerait la même pression.* — Proposons-nous donc de *ramener* à 0° une hauteur barométrique H, observée à une température t.

Et d'abord, on a observé la hauteur H sur une échelle métallique, dont on suppose la division effectuée à 0°; d'après ce qu'on a vu (242), la hauteur réelle de la colonne barométrique est

$$H' = H(1 + lt),$$

l étant le coefficient de dilatation linéaire du métal de l'échelle.

Désignons maintenant par H_0 la hauteur de la colonne de mercure à 0° qui exercerait la même pression, par d et d_0 les densités du mercure à t degrés et à 0°; les poids spécifiques sont dg et $d_0 g$. La colonne H', à $t°$, presse une surface s avec une force $sH'dg$; la colonne H_0, à 0°, presserait la même surface avec une force $sH_0 d_0 g$: pour que ces forces soient égales, il suffit que l'on ait

$$H'd = H_0 d_0.$$

Mais les densités d et d_0 sont, comme on l'a vu (213), inversement proportionnelles aux binômes de dilatation $1 + mt$ et 1. Donc

$$H_0 = H' \frac{1}{1 + mt}.$$

Si l'on remplace H' par sa valeur, on obtient pour la hauteur barométrique, corrigée à la fois de la dilatation de la règle et de la dilatation du mercure,

$$H_0 = H \frac{1 + lt}{1 + mt}$$

248. Détermination des températures au moyen du thermomètre à poids. — L'instrument désigné sous le nom de *thermomètre à poids* (*fig.* 168), dont nous avons indiqué l'emploi pour la détermination des coefficients de dilatation des liquides, peut servir à la mesure des températures. Dulong et Petit l'ont fréquemment employé pour cet usage. — Il a l'avantage de pouvoir toujours être complètement plongé dans

l'enceinte qui est soumise à l'expérience, et de ne point exiger de graduation préalable.

Après avoir déterminé, comme il a été dit (220, 1°), le poids P de mercure qui remplit l'appareil à 0°, on le porte dans le milieu dont on veut obtenir la température x (température supposée supérieure à 0°), et on détermine le poids p_1 de mercure qui s'échappe par la pointe. Si l'on prend, pour coefficient de dilatation apparente du mercure dans le verre, la valeur adoptée par Dulong et Petit, savoir $\frac{1}{6480}$, on a

$$\frac{1}{6480} = \frac{p_1}{(P - p_1)\,x},$$

d'où l'on tire la valeur de la température x (*).

III. — APPLICATIONS DES DILATATIONS DES GAZ. THERMOMÈTRES A GAZ.

249. Thermomètre à air. — Nous avons vu que le thermomètre normal est le thermomètre à air, la température étant mesurée par la *variation de la force élastique*, à volume constant (205). L'appareil de Regnault (*fig.* 175) est éminemment propre à ce genre de mesures. La graduation de la branche AB devient inutile; en ajoutant ou retranchant du mercure dans la branche ouverte du manomètre, on fait en sorte que le mercure affleure toujours au point B. Le bain d'eau qui entoure les deux branches du manomètre peut être supprimé.

Soit V_0 le volume du ballon à 0°, v le volume du tube jusqu'au point B, et t la température ambiante. — Lorsque le ballon est entouré de glace fondante, la plus grande partie de la masse d'air étant à 0°, la force élastique est H; elle diffère peu de 76 centimètres. Si l'air contenu dans le tube était à 0°, son volume serait $\frac{v}{1 + \alpha t}$; et le volume total de la masse d'air à 0° sous la pression initiale H, serait

$$V_0 + \frac{v}{1 + \alpha t}.$$

Le ballon étant placé dans un bain dont la température T est inconnue, il faut, pour rétablir l'affleurement sensiblement au point B, verser du mercure dans la branche MN; soit H′ la force élastique de l'air, obtenue en ajoutant à la hauteur barométrique la différence des

(*) Si, pour plus de précision, on veut introduire dans ce calcul, au lieu du nombre $\frac{1}{6480}$, le coefficient de dilatation apparente μ du mercure *dans l'instrument lui-même*, il suffit d'effectuer une expérience préliminaire à une température connue T, à 100° par exemple, et d'en déduire la valeur de μ comme nous l'avons dit (220, 1°).

niveaux dans les deux branches AB et MN. — La masse d'air se compose de deux parties : l'une, à la température T, occupe un volume $V_0(1 + kT)$, k étant le coefficient de dilatation cubique du verre ; l'autre occupe un volume v' peu différent de v, à la température ambiante t' ; si cette deuxième partie était à la température T, son volume serait $v' \frac{1 + \alpha T}{1 + \alpha t'}$. Donc, le volume final de la masse d'air, à la température T et sous la pression H', serait :

$$V_0(1 + kT) + v' \frac{1 + \alpha T}{1 + \alpha t'}.$$

En appliquant la formule de Gay-Lussac (230), on aura une équation qui fera connaître la valeur de T :

$$\left[V_0 + \frac{v}{1 + \alpha t}\right] H = \left[V_0(1 + kT) + v' \frac{1 + \alpha T}{1 + \alpha t'}\right] \frac{H'}{1 + \alpha T}.$$

250. Thermomètre à air, de Dulong et Petit. — Avant les expériences de Regnault, Dulong et Petit avaient employé un thermomètre à air qui offre une disposition plus simple, et dont la précision, sans être aussi grande, est généralement suffisante dans la pratique. — La manipulation en a d'ailleurs été perfectionnée par Regnault.

Fig. 182.

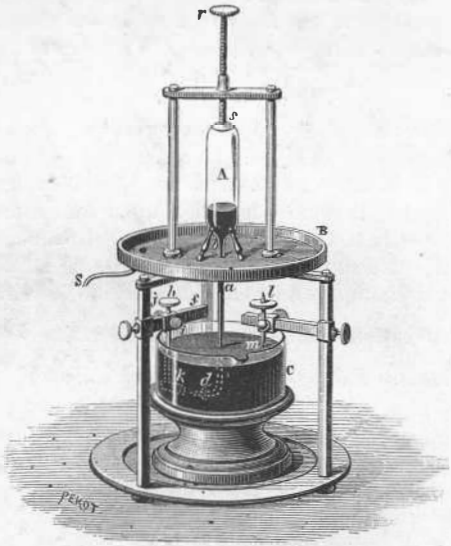


Fig. 183. — Thermomètre à air de Dulong et Petit.

Un réservoir de verre cylindrique **A** (*fig.* 182), surmonté d'un tube *ab* qui se termine par une pointe ouverte *c*, est placé dans le milieu dont on veut déterminer la température : il est mis en communication, par un raccord de caoutchouc, avec une série de tubes desséchants, communiquant eux-mêmes

avec une pompe à main. On fait un grand nombre de fois le vide dans l'appareil, en laissant chaque fois rentrer l'air très lentement : après la dernière rentrée d'air, on met, pendant quelques instants, l'air intérieur en communication avec l'atmosphère; on ferme alors au chalumeau la pointe c, et on note la hauteur du baromètre. On a ainsi l'appareil plein d'air sec, à la température T, et sous la pression H de l'atmosphère.

On le transporte, en le renversant, sur le support représenté par la figure 183, où il est maintenu par la tige rs, de manière que l'extrémité recourbée du tube plonge dans une cuve à mercure C. On a fait à l'avance un trait de lime au voisinage de la pointe, de manière à permettre de la détacher à l'aide d'une pince : le mercure pénètre dans le tube et s'élève à une certaine hauteur dant le réservoir. On environne celui-ci de glace fondante, contenue dans un manchon placé sur le plateau B, et, au bout d'une heure environ, on ferme de nouveau la pointe en y amenant une petite cuiller de fer k, remplie de cire molle, et portée par la vis h, dont les supports peuvent se déplacer le long de la tige horizontale f. On note la hauteur H′ du baromètre, et, après avoir enlevé le manchon et la glace qui entourent le réservoir, on mesure au cathétomètre la hauteur h du mercure soulevé : la vis à deux pointes lm sert à effectuer cette mesure, comme dans le baromètre fixe (125), avec une grande précision.

On enlève l'appareil de son support, avec le mercure qui y a pénétré, et on le pèse : soit P′ son poids. — On l'emplit complètement de mercure à 0°, et on le pèse à nouveau; soit P le poids trouvé. — Enfin on a déterminé, avant l'expérience, le poids p de l'enveloppe seule.

Au moment de la première fermeture, le volume de l'air à T degrés était égal au volume de l'enveloppe, c'est-à-dire à $\frac{P-p}{D_0}(1+kT)$, en désignant par D_0 la densité du mercure à 0°, et par k le coefficient de dilatation cubique du verre; la pression était H. — Au moment de la seconde fermeture, le volume de cette masse d'air était $\frac{P-P'}{D_0}$; la pression était $H'-h$. — En ramenant chacun de ces volumes à 0° et à la pression de 76 centimètres et égalant les deux expressions, on a :

$$\frac{P-p}{D_0}\cdot\frac{H}{76}\cdot\frac{1+kT}{1+\alpha T}=\frac{P-P'}{D_0}\cdot\frac{H'-h}{76},$$

équation d'où l'on tire la valeur de l'inconnue T (*).

(*) Lorsqu'on brise la pointe du tube sous le mercure, Regnault a reconnu qu'une petite quantité d'air est aspirée dans le réservoir, par une sorte de gaine qui reste entre la paroi extérieure de la tige et le mercure qui ne mouille pas le verre. Il est parvenu à empêcher cet effet de se produire, en adaptant sur le tube, dans la partie plongée, de petits disques d'une substance qui se laisse mouiller par le mercure, comme le laiton bien décapé : ce sont ces petits disques qui sont représentés en d dans la figure 183. Pour plus de sûreté, on verse sur le mercure, après avoir saisi la pointe avec la pince, une couche d'acide sulfurique : on enlève l'acide avant de faire descendre la vis à deux pointes lm.

IV. — CORRECTIONS AUX DENSITÉS

251. Corrections à faire subir aux résultats, dans la détermination des densités des corps solides ou liquides. — La densité d'un corps solide ou liquide est variable, comme l'est son volume, avec la température; les densités des divers corps ne sont donc comparables qu'à la condition d'avoir été calculées *à une même température*. On a choisi la température de 0°.

Dans les diverses méthodes qui ont été indiquées (100 à 104), si l'on employait de l'eau à la température du laboratoire, on pourrait, en tenant compte de sa densité (*), déduire des données de l'expérience le volume réel du corps et par suite sa densité, à la température de l'expérience : mais encore faudrait-il connaître exactement cette température, et il resterait toujours quelque incertitude sur sa constance pendant l'opération. — Regnault a proposé d'opérer avec de l'eau à la température de la glace fondante, température qu'il est toujours facile de maintenir dans une *petite quantité* d'eau. Aussi est-ce la méthode du flacon que l'on emploie de préférence.

252. Méthode du flacon, modifiée par Regnault. — Détermination des densités à 0°. — Regnault a indiqué l'emploi, pour les corps solides, de petits flacons qui ont la forme représentée par la figure 184. Dans le goulot s'engage un bouchon creux, présentant une partie capillaire sur laquelle est tracé un trait d'affleurement *a*. — Le flacon débouché ayant été rempli d'eau, on introduit le bouchon qui, déplaçant un peu de liquide, fait monter le niveau jusque dans l'entonnoir B. On place alors le flacon dans la glace fondante, et on l'y laisse séjourner jusqu'à ce que le niveau paraisse invariable; on enlève, avec un petit rouleau de papier buvard, le liquide qui dépasse le trait *a*, et l'on retire ensuite le flacon de la glace. On le laisse reprendre la température du laboratoire, afin d'éviter qu'il y ait condensation d'eau à sa surface pendant la pesée; on l'essuie et on le porte sur le plateau de la balance, en plaçant à côté de lui le corps soumis à l'expérience, comme il a été dit (100). On fait la tare, et on détermine le nombre M de poids marqués qu'il faut substituer au corps pour rétablir l'équilibre. — On introduit alors le corps dans le flacon, on replace le bouchon, on remet le flacon dans la glace, et on rétablit l'affleurement au trait *a*; on retire ensuite le flacon, on le laisse reprendre la température du laboratoire, et on détermine le poids M′, qu'il faut ajouter pour faire équilibre à la tare précédente.

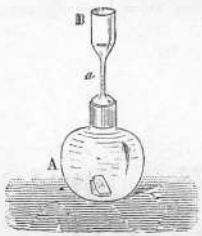


Fig. 184.

La méthode s'applique aux corps liquides, en employant les flacons décrits précédemment (*fig.* 81). — L'affleurement au trait *a* est toujours établi, soit pour le liquide soumis à l'expérience, soit pour l'eau, pendant que le flacon est à la température de la glace fondante.

Pour déduire des données de l'expérience, pour un corps solide par exemple, la densité de ce corps à 0°, on peut raisonner comme il suit :

En faisant usage des unités C.G.S., soit V le volume du corps à 0°, D sa densité absolue, Δ celle du métal des poids marqués, *e* celle de l'eau à 0°, et

(*) Voir le tableau de la page 173.

a celle de l'air dans les conditions de l'expérience ; désignons par k le coefficient de dilatation du corps, par k' celui des poids, par t la température à laquelle ont été effectuées les pesées, et par g l'intensité de la pesanteur Dans la première pesée, le poids apparent du corps est égal au poids apparent de la masse échantillonnée M :

$$(1) \qquad VDg - V(1 + kt)\,ag = Mg - \frac{M}{\Delta}(1 + k't)ag.$$

Dans la deuxième opération, le corps étant dans le flacon ne subit plus la poussée de l'air, mais il y a en moins dans le flacon la masse d'eau déplacée par le corps à 0°. Le poids apparent de la masse M′ représente donc la différence du poids de cette masse d'eau et de la poussée de l'air :

$$(2) \qquad Veg - V(1 + kt)\,ag = M'g - \frac{M'}{\Delta}(1 + k't)\,ag.$$

En supprimant partout le facteur commun g et en divisant l'équation (1) par l'équation (2), membre à membre, il vient :

$$(3) \qquad \frac{D - a(1 + kt)}{e - a(1 + kt)} = \frac{M}{M'}.$$

Remarque. — La densité de l'eau à 0° est connue, elle est égale à 0,999873 (225) ; la masse du centimètre cube d'air dans les conditions de l'expérience est, en supposant l'air sec : $a = 0{,}001293\,\frac{H}{76}\cdot\frac{1}{1 + 0{,}00367\,t}$. Dans la plupart des cas, on prend $a = 0{,}001293$, et on néglige le produit kt vis-à-vis de l'unité La formule devient alors :

$$(4) \qquad \frac{D - a}{e - a} = \frac{M}{M'}.$$

CHAPITRE V

CHANGEMENTS D'ÉTAT DES CORPS

PASSAGE DE L'ÉTAT SOLIDE A L'ÉTAT LIQUIDE, ET PASSAGE INVERSE DE L'ÉTAT LIQUIDE A L'ÉTAT SOLIDE.

253. Changements d'état des corps, sous l'action de la chaleur. — Lorsqu'on porte un corps solide à des températures de plus en plus élevées, il arrive en général un moment où il devient liquide : c'est le phénomène de la *fusion*. — Réciproquement, les corps liquides, lorsqu'on les refroidit suffisamment, peuvent prendre l'état solide : c'est le phénomène de la *solidification*.

Enfin, les liquides, en absorbant de la chaleur, se transforment en des corps gazeux, qu'on désigne plus particulièrement sous le nom de *vapeurs* : c'est le phénomène de la *vaporisation*. — Réciproquement, les vapeurs, en perdant la chaleur qu'elles avaient gagnée, reviennent à l'état liquide : c'est le phénomène de la *condensation* ou de la *liquéfaction*.

Nous allons étudier successivement chacun de ces *changements d'état*.

254. Phénomène de la fusion. — Pour nous faire une idée des particularités que présente le phénomène de la fusion, plaçons des morceaux d'étain sur le feu, dans une cuiller de fer. La température s'élevant progressivement, il arrive un moment où l'on voit couler des gouttes d'étain fondu : toute la masse fond ainsi peu à peu, et, au bout de quelque temps, il ne reste plus que de l'étain liquide. — Ce qu'il importe de remarquer, c'est que, si un thermomètre est placé au milieu de l'étain, on observe que la fusion commence toujours *à une même température*, qui est ici de 230°; cette température est ce qu'on appelle le *point de fusion* de l'étain. — On observe, en outre, que *la température reste constante*, depuis le moment où la fusion commence jusqu'au moment où elle se termine.

En général, si l'on fait abstraction des corps, tels que le verre, qui ne deviennent liquides qu'en passant par une série d'états plus ou moins pâteux, le phénomène de la fusion est soumis aux deux lois suivantes :

1° *Un même corps entre toujours en fusion à une même température*, qu'on appelle *son point de fusion.*

2° *Cette température une fois atteinte, la fusion du corps s'effectue d'une manière successive, sa température demeurant invariable pendant toute la durée du phénomène.*

255. Points de fusion des divers corps. — Chaque substance a un point de fusion déterminé, qui est souvent un indice précieux de sa pureté, car la présence de matières étrangères peut faire varier de plusieurs degrés la température de la fusion.

La glace fond exactement à 0°, puisqu'on a pris précisément la température de la glace fondante pour fixer le zéro du thermomètre. — Le tableau suivant donne les points de fusion de quelques corps solides, classés par ordre alphabétique.

	POINTS DE FUSION.		POINTS DE FUSION
Acier	1500 à 1400°	Iode	107°
Antimoine	440	Mercure	—40
Argent	1000	Or	1250
Bismuth	265	Phosphore	44
Blanc de baleine	49	Plomb	320
Cire blanche	68	Potassium	58
Étain	230	Sodium	90
Fer	1500 à 1600	Soufre	110
Fonte blanche	1050 à 1100	Suif	44
Fonte grise	1100 à 1200	Zinc	430
Glace	0°		

Certains corps solides ont été considérés d'abord comme *réfractaires*, c'est-à-dire comme infusibles ; à mesure que l'on est parvenu à produire des températures plus élevées, on a vu diminuer le nombre de ces corps. — Despretz, en combinant les effets calorifiques du soleil, de la pile et du chalumeau à gaz, a fondu l'alumine, la magnésie, et ramolli le charbon. — En activant la flamme du gaz d'éclairage par un courant d'oxygène, et opérant dans un petit four en chaux vive, H. Sainte-Claire Deville et Debray ont pu fondre plusieurs kilogrammes de platine, et c'est là une opération qui est maintenant entrée dans la pratique industrielle. — Tout porte à croire que, avec des sources de chaleur suffisamment énergiques, on parviendrait à fondre toutes les substances solides, à l'exception d'un certain nombre de corps composés, dont les éléments se dissocient avant que ces corps entrent en fusion.

256. Chaleur de fusion. — La température d'un corps demeurant invariable pendant tout le temps que dure sa fusion, quelle que soit l'activité du foyer de chaleur qui lui est appliqué, on en doit conclure que la chaleur fournie par le foyer est uniquement employée à produire le changement d'état : on nomme *chaleur latente de fusion*, ou simple-

ment *chaleur de fusion*, la chaleur que doit absorber un corps solide, pour passer à l'état liquide sans changement de température.

Nous verrons plus loin (chapitre IX) comment on peut mesurer la chaleur de fusion des divers corps.

257. Solidification. — Prenons maintenant de l'étain *liquide*, chauffé au-dessus de son point de fusion, à 260° ou 280° par exemple, et observons ce qui se passe quand on le laisse refroidir. — Au moment où il revient à sa température de fusion, c'est-à-dire à 230°, une partie de la masse commence à se solidifier; la solidification se continue ensuite, *sans variation de température*, à mesure que l'étain abandonne la chaleur qu'il avait prise pour fondre. C'est seulement lorsque toute la masse est devenue solide, que la température commence à s'abaisser au-dessous de 230°.

En général, si l'on fait abstraction des corps qui passent par une série d'états pâteux, on peut dire que le phénomène de la solidification est assujetti à des lois semblables à celles de la fusion : un corps liquide tend à se solidifier à une température déterminée, qui est précisément la *température de fusion* du corps solide dans lequel il se transforme, et il conserve cette même température pendant tout le temps que dure la solidification de la masse tout entière.

Cependant la solidification présente une anomalie qu'il est important de signaler. — Il est rare qu'une masse *entièrement liquide* commence à se solidifier à la température précise qu'indique la règle précédente : le plus souvent, on peut abaisser sa température notablement au-dessous de la température de fusion, sans que la solidification se produise. — Ce phénomène a été désigné sous le nom de *surfusion ;* nous allons en indiquer les principales particularités.

258. Phénomènes de surfusion. — Expériences de M. Gernez. — Lorsqu'un liquide est placé dans des conditions telles, qu'il ne se trouve, en aucun point de sa masse, *aucune parcelle solide semblable à celles dans lesquelles il se transformerait*, l'expérience montre qu'il peut se refroidir à une température bien inférieure à son point de fusion, sans passer à l'état solide.

Mais si l'on vient alors à y introduire une parcelle du corps solide dans lequel le liquide peut se transformer, la solidification se produit. Si elle n'est pas complète, elle porte sur une portion de la masse d'autant plus grande que la température était plus basse; en outre, *la température remonte à la température de fusion du corps.* — Cette dernière particularité s'explique, en remarquant que les parties solidifiées abandonnent leur chaleur de fusion, laquelle sert à réchauffer le reste de la masse : la solidification porte donc seulement, au premier instant, sur une quantité de substance telle, que la chaleur dégagée par elle fasse remonter la température de la masse tout entière jusqu'au point de fusion.

Voici une expérience, qui est due à M. Gernez, et qui permet de réaliser facilement la surfusion, pour le phosphore. — Dans un grand ballon de verre plein d'eau (*fig.* 185), on assujettit un large tube A contenant du phosphore B, couvert d'une couche d'eau C; à côté de ce tube, est fixé un thermomètre T. L'eau du ballon étant chauffée au-dessus de 44°, le phosphore fond; on retire alors le ballon du feu, et comme la masse d'eau est considérable, elle se refroidit avec une extrême lenteur. Au bout de plusieurs heures, la température étant descendue à 30°, par exemple, c'est-à-dire à une quinzaine de degrés au-dessous du point de fusion du phosphore, le phosphore n'est pas encore solidifié. — On peut même y plonger une baguette de verre, sans produire la solidification. Mais, si l'on frotte légèrement l'extrémité de cette baguette sur un morceau de phosphore solide, de manière à en détacher une parcelle, et qu'on touche ensuite avec cette extrémité la surface du phosphore surfondu, la solidification est instantanée. Le plus souvent, le phosphore se solidifie si rapidement, que la tige de verre ne peut y pénétrer.

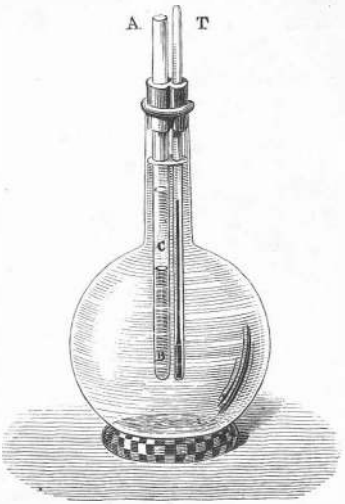


Fig. 185. — Surfusion du phosphore

Ce qu'il importe de remarquer, c'est qu'un corps solide ne peut faire cesser la surfusion, qu'à la condition de présenter une forme cristalline semblable à celle des cristaux qui peuvent se former. Ainsi, une parcelle de phosphore rouge ne détermine pas la solidification du phosphore surfondu.

259. Expériences de M. Louis Dufour. — Le phénomène de la surfusion est facilement réalisable quand le liquide est enfermé dans un tube capillaire; par ce procédé, Despretz avait pu refroidir l'eau jusqu'à — 20° sans qu'elle se congelât.

M. L. Dufour, de Lausanne, a obtenu le même résultat, en maintenant des gouttes d'eau en suspension dans un liquide de même densité, formé de chloroforme et d'huile d'amandes douces. — Dans une solution de chlorure de zinc, des gouttes de phosphore ont pu conserver l'état liquide au-dessous de 0°. — La solidification se produit immédiatement, si l'on vient à toucher les gouttes liquides avec un fragment solide du même corps.

260. Changements de volume qui accompagnent la fusion ou la solidification. — La plupart des corps liquides, en passant à l'état solide, éprouvent une *diminution de volume* et, par suite, un *accroissement de densité*. — Pour s'en convaincre, il suffit de remarquer, par exemple, que des fragments de soufre solide restent au fond d'une masse de soufre liquide. Il en est de même de la cire, du plomb et des métaux en général.

L'eau fait exception à cette règle. La glace flotte à la surface de l'eau liquide; la densité de la glace est donc moindre que celle de l'eau : elle est environ 0,92.

Cette propriété exceptionnelle de l'eau présente, dans la nature, une importance considérable. — En effet, pendant les hivers rigoureux, c'est par la surface que les eaux de nos lacs ou de nos rivières éprouvent d'abord l'action du froid; s'il vient à se former une couche consistante, elle préserve de la congélation les parties profondes. — Si, au contraire, la glace, à mesure qu'elle se forme, tombait successivement au fond, toute la masse d'eau ne tarderait pas à se congeler, et la vie des animaux ou des végétaux y deviendrait impossible.

L'augmentation de volume qu'éprouve l'eau, au moment où elle se congèle, s'effectue avec une force d'expansion considérable. — Un canon de pistolet rempli d'eau, fermé par un bouchon à vis, et placé dans un mélange réfrigérant (*fig.* 186), se déchire, en produisant un bruit sec, au moment où l'eau intérieure se congèle (*). — Pendant les hivers rigoureux, les tuyaux qu'on a laissés remplis d'eau se fendent. — Ainsi s'expliquent encore les effets funestes que produisent les gelées sur les végétaux, en brisant les parois des tissus qui sont remplis de sève.

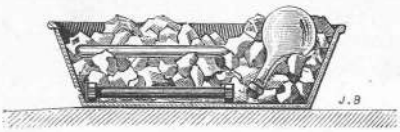


Fig. 186. — Augmentation du volume de l'eau au moment de la congélation.

261. Influence de la pression sur la température de fusion. — Des expériences de Sir William Thomson et de Bunsen ont montré que la pression peut modifier la température de fusion.

Pour les corps exceptionnels dont le volume augmente par la solidification, un accroissement de pression *abaisse* la température de fusion. Tel est le cas de la glace, dont le point de fusion peut descendre jusqu'à — 0°,15, sous une pression de 17 atmosphères (Sir W. Thomson).

Au contraire, pour les corps dont le volume diminue par la solidifi-

(*) La figure 186 montre le canon de pistolet, placé au fond d'un mélange de glace et de sel. A défaut d'un canon de pistolet, on peut prendre, soit un tube de verre, soit un ballon de verre fermé avec un bouchon de liège : la congélation se produisant d'abord dans le goulot du ballon, il se forme à l'intérieur une sorte de bouchon de glace, qui rend la fermeture plus hermétique.

cation, un accroissement de pression *élève* la température de fusion. C'est ce qui a été vérifié par Bunsen pour le blanc de baleine : ce corps fond à 47°,7 sous la pression atmosphérique, et à 50°,9 sous une pression de 165 atmosphères.

262. Phénomène du regel. — Pour la glace en particulier, l'*abaissement du point de fusion*, produit par la pression, permet d'expliquer le phénomène qu'on désigne sous le nom de *regel*. — Supposons que des fragments de glace, pris à 0°, soient soumis à une pression capable d'abaisser sensiblement le point de fusion : une partie de la glace va se liquéfier, en absorbant la chaleur de fusion nécessaire pour la faire passer à l'état liquide. Il va donc se produire, par le fait même de la fusion, un abaissement de température; mais l'eau, ainsi amenée à une température inférieure à 0 degré, ne pourra rester à l'état liquide que si la pression est maintenue; si la pression vient à être supprimée, la congélation se produira de nouveau : c'est le phénomène du *regel*.

Ainsi, en pressant fortement l'un contre l'autre deux morceaux de glace, on ne tarde pas à les souder. Dans ce cas, c'est en pénétrant dans les interstices laissés par les irrégularités des surfaces en contact, que l'eau se soustrait à la pression qui l'avait liquéfiée, et arrive à se solidifier de nouveau.

Prenons un bloc de glace, que nous ferons reposer sur des supports (*fig.* 187), et sur lequel nous placerons un fil métallique, tendu par

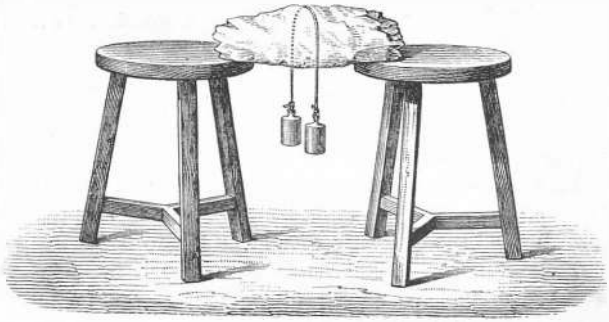


Fig. 187. — Phénomène du regel.

des poids de quelques kilogrammes. Nous verrons le fil métallique se frayer peu à peu un chemin au travers du bloc; mais ce chemin se refermera immédiatement de lui-même, par le *regel* de l'eau de fusion que la pression avait produite. — Au bout de quelque temps, le fil aura traversé la glace, sans y laisser de discontinuité.

263. Moulage de la glace — Phénomènes offerts par les glaciers. — L'expérience suivante, qui est due à Tyndall, s'explique encore

par le phénomène du regel. — On prend deux blocs de bois dur A, B (*fig.* 188), creusés chacun d'une cavité en forme de portion de sphère, de sorte que, quand ils sont superposés, ils laissent un espace vide, ayant la forme d'une lentille. Entre ces deux blocs on place de la glace pilée, et on la comprime fortement, à l'aide d'une presse. La glace se brise d'abord en fragments plus petits ; mais bientôt ces fragments se réunissent entre eux, et l'on obtient finalement une lentille de glace transparente.

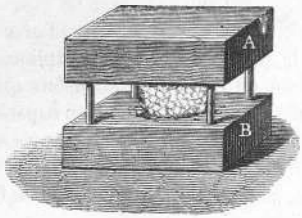


Fig. 188. — Moulage de la glace.

Cette expérience fournit une explication des phénomènes que présentent les *glaciers*, dans les pays de montagnes. — La neige qui tombe sur les sommets des montagnes se transforme d'abord, sous l'influence de sa propre pression, en une masse qui n'est plus pulvérulente comme la neige, mais qui n'a pas encore la transparence de la glace : c'est ce qu'on appelle le *névé*. — Le névé, en glissant sur la pente des montagnes, et en arrivant dans les vallées, supporte des pressions de plus en plus grandes, de la part des couches qui s'accumulent à la partie supérieure. Il se transforme alors en une masse de glace transparente, qui se moule sur le contour des vallées, et constitue les *glaciers* proprement dits.

264. Dissolution des corps solides dans les liquides. — Mélanges réfrigérants. — Le sucre, mis en présence de l'eau, se transforme en un liquide qui se diffuse dans l'eau elle-même. — Ce mode particulier de passage de l'état solide à l'état liquide a reçu le nom de *dissolution*.

La dissolution d'un corps solide dans un liquide, lorsqu'elle n'est accompagnée d'aucun phénomène chimique, détermine un *abaissement de température*, à cause de l'absorption de chaleur qui est nécessaire pour produire la fusion. — C'est ainsi qu'en faisant dissoudre de l'azotate d'ammoniaque dans un poids d'eau égal au sien, on obtient un abaissement de température d'environ 26 degrés. Si, par exemple, l'eau et le sel étaient primitivement à 12°, le mélange descendrait à — 14° environ.

Dans les laboratoires ou dans l'industrie, on fait usage de mélanges de ce genre, pour abaisser la température des corps qui y sont plongés. — Ces *mélanges réfrigérants* peuvent être composés de manières très diverses : nous en citerons encore un ou deux exemples.

Le mélange formé de 3 parties de sulfate de soude et de 2 parties d'acide chlorhydrique sert pour fabriquer des glaces ou des sorbets, dans des appareils connus sous le nom de *glacières* (*fig.* 189). Le mélange réfrigérant est placé dans un vase AB, qu'on entoure de drap

pour le préserver du contact de l'air; le liquide sucré que l'on veut refroidir est introduit dans le vase métallique CD. On agite vivement, de manière à accélérer l'opération : c'est là une condition de succès, puisqu'il faut diminuer autant que possible le réchauffement produit par l'air extérieur et par le rayonnement des corps environnants.

Fig. 189. — Fabrication des glaces et des sorbets.

Enfin, on emploie fréquemment un mélange de glace pilée et de sel marin, qui peut abaisser la température jusqu'à une vingtaine de degrés au-dessous de zéro. — L'efficacité de ce mélange est due, non seulement à la fusion du sel, mais aussi à ce que la présence du sel accélère considérablement la fusion de la glace; dès lors, la glace ne peut plus emprunter à l'air qu'une très petite partie de la chaleur qui lui est nécessaire pour passer à l'état liquide : la plus grande partie de cette chaleur est empruntée au mélange lui-même (*).

265. Limite inférieure des températures que peut atteindre un mélange réfrigérant, formé de glace et d'un sel déterminé. — En général, un mélange réfrigérant, formé de glace et d'un sel déterminé, ne peut faire descendre la température que jusqu'à un point déterminé. C'est ce dont on peut se rendre compte par une expérience simple.

Prenons une solution *saturée* de sel marin dans l'eau et entourons le vase qui la contient d'un mélange réfrigérant, capable d'abaisser la température jusqu'à —35° par exemple. Un thermomètre, plongé dans la solution, indiquera des températures graduellement décroissantes, mais seulement jusqu'à —21° environ; à partir de ce moment, on constatera qu'il se forme à la fois des cristaux de sel marin et des cristaux de glace; le thermomètre ne s'abaissera au-dessous de —21° qu'après la solidification totale du sel et de la glace. — Il est évident, d'après cela, que, si l'on emploie, pour une expérience quelconque, un mélange de glace et de sel marin, la température ne pourra jamais s'abaisser, par le fait de la fusion du mélange, au-dessous de —21°; car, si elle descendait au-dessous, les cristaux de sel se reformeraient, avec dégagement de la chaleur de fusion. Une fois cette température atteinte, si le mélange n'est pas entièrement fondu, la température restera stationnaire jusqu'à ce que la chaleur fournie par les corps environnants ait achevé la fusion.

On trouve ainsi, pour chaque sel, une *limite inférieure* des températures que peut atteindre le mélange de ce sel avec la glace : cette limite n'est autre que le *point de congélation de la solution saturée* de ce sel dans l'eau.

(*) Si l'on mélange de la neige avec de l'acide sulfurique (acide dont le mélange avec l'eau *liquide* détermine une élévation de température), les résultats obtenus sont très différents, selon les proportions employées. — Avec une petite quantité de neige, 1 partie pour 4 d'acide sulfurique, on obtient un mélange dont la température s'élève à + 80°. Avec une grande quantité de neige, 4 parties pour 1 d'acide sulfurique, on obtient un mélange dont la température s'abaisse à — 20°.

Le tableau suivant indique les températures les plus basses que puissent atteindre les mélanges formés de glace et de quelques sels (*).

Sulfocyanure de potassium	— 35°,2
Sel marin	— 21°,2
Azotate d'ammoniaque	— 16°,75
Chlorhydrate d'ammoniaque (sel ammoniac)	— 15°,3
Chlorure de potassium	— 10°,8
Azotate de potasse (nitre ou salpêtre)	— 2°,8

Le chlorure de calcium donne, avec la neige, un mélange réfrigérant des plus énergiques, dont la limite n'est pas encore connue : elle doit être voisine de —50°. On peut employer ce mélange, par exemple, pour opérer la congélation du mercure, qui a lieu à —40°.

266. Phénomènes de sursaturation. — Pour la plupart des sels, la solubilité dans l'eau augmente avec la température. Il en résulte que, si l'on prépare *à chaud* une solution *saturée* d'un sel présentant cette propriété, et si on laisse refroidir cette solution, une partie du sel doit reprendre l'état solide : c'est l'un des procédés les plus employés en Chimie, pour obtenir la cristallisation des sels par *voie humide*.

Cependant, dans la plupart des cas, s'il ne reste, en présence de la solution chaude, aucune parcelle solide du sel qui a servi à la former, on peut laisser la température s'abaisser beaucoup, sans que la cristallisation commence; c'est un phénomène analogue à la surfusion (258); on le désigne sous le nom de *sursaturation*.

Ainsi, une solution chaude et concentrée de sulfate de soude ayant été introduite dans un ballon, et le col du ballon étant recouvert d'un capuchon de papier pour empêcher la chute des poussières de l'atmosphère, on constate que cette solution refroidie peut se conserver sursaturée pendant un temps à peu près indéfini. Si l'on vient à retirer le capuchon de papier, on voit se produire des aiguilles cristallines, qui se forment d'abord *à la surface* du liquide et qui envahissent bientôt la masse tout entière.

267. Causes capables de déterminer la cristallisation dans les solutions saturées. — M. Gernez a montré que, dans l'expérience précédente, la cristallisation est provoquée par l'arrivée de petits cristaux de sulfate de soude, qui flottent dans l'atmosphère, et qui sont surtout abondants dans l'air des laboratoires. Si quelques ballons ne cristallisent pas au moment où on les découvre, il suffit, pour déterminer la cristallisation, d'y faire tomber un petit cristal de sulfate de soude, ou d'y introduire une baguette portant une parcelle du sel cristallisé : on voit des aiguilles cristallines partir du point touché, et rayonner ensuite dans toute la masse.

(*) Les nombres de ce tableau ont été déterminés, pour la plupart, par le point de congélation de la solution saturée : ils sont extraits, soit des mémoires de M. Rüdorff, soit d'un travail inédit de M. Nouel.

Le phénomène de la sursaturation est d'ailleurs particulièrement facile à produire avec les sels déliquescents, qui ne peuvent pas se trouver à l'état de poussières solides dans l'atmosphère. — C'est ainsi, par exemple, qu'une solution sursaturée d'azotate de chaux, obtenue par l'action de la chaleur sur des cristaux additionnés de très peu d'eau, peut être étendue en couche mince sur une plaque de verre, sans cristalliser. Mais si l'on prend, à l'extrémité d'une baguette, un petit cristal d'azotate de chaux, et qu'on promène rapidement la baguette dans la couche liquide, on voit la cristallisation partir instantanément des points touchés, et envahir ensuite la couche tout entière.

268. Action des corps isomorphes, pour déterminer la cristallisation. — Ce qui constitue l'efficacité d'un cristal introduit dans une solution sursaturée, pour déterminer la cristallisation, c'est l'identité de sa *forme* avec celle des cristaux qui peuvent prendre naissance.

Ainsi, une solution sursaturée de chromate de soude ($NaO,CrO^3 + 10HO$) cristallise par l'introduction d'un cristal de sulfate de soude ($NaO,SO^3 + 10HO$), qui a même forme cristalline. — Une solution saturée d'alun ordinaire cristallise par l'introduction d'un cristal d'alun de chrome.

Certains sels, tels que le chlorate de soude, ont la propriété de pouvoir donner deux espèces de cristaux, de formes *symétriques*, c'est-à-dire dont les types peuvent être placés à droite et à gauche d'un plan vertical, de manière que les sommets de l'un soient symétriques des sommets de l'autre. Or, dans une solution sursaturée de chlorate de soude, l'introduction d'un cristal du *type droit* produit exclusivement des cristaux du type droit; l'introduction d'un cristal du *type gauche* produit exclusivement des cristaux du type gauche. — Le formiate de strontiane donne lieu aux mêmes remarques.

269. Chaleur dégagée pendant la cristallisation. — La formation rapide d'une grande quantité de cristaux, dans une solution sursaturée, est éminemment propre à manifester le dégagement de chaleur qui correspond à la solidification. — Dans les expériences faites avec le sulfate de soude (266), l'élévation de température, au moment de la cristallisation, peut être constatée en appliquant simplement la main sur les ballons.

Si l'on fait une solution sursaturée d'hyposulfite de soude (en chauffant ce sel avec très peu d'eau et laissant refroidir), qu'on y plonge un tube contenant de l'éther, et qu'on détermine la cristallisation par l'introduction d'un cristal du même sel, on voit l'éther entrer en ébullition.

CHAPITRE VI

PROPRIÉTÉS DES VAPEURS

270. Vaporisation, ébullition, évaporation. — On donne le nom général de *vaporisation*, au passage de l'état liquide à l'état gazeux.

La vaporisation peut se produire sous deux formes différentes : 1° l'*ébullition*, ou production de vapeurs dans toute la masse du liquide, sous forme de bulles qui viennent crever à la surface ; 2° l'*évaporation*, ou production insensible de vapeurs à la surface libre.

Il est nécessaire, pour l'intelligence de ces phénomènes, de connaître d'abord les propriétés générales des vapeurs.

I. — MESURE DE LA FORCE ÉLASTIQUE DES VAPEURS FORMÉES DANS LE VIDE.

271. Formation des vapeurs dans le vide. — Plusieurs tubes barométriques, C, D, E, F (*fig.* 190), étant installés dans une même cuvette, on fait passer dans le tube D, à l'aide d'une pipette recourbée, une petite quantité d'eau ; en E, de l'alcool ; en F, de l'éther. Dès que ces liquides arrivent à la surface du mercure, on voit le niveau s'abaisser ; une partie des liquides s'est donc vaporisée. — Les dépressions $m'p'$, $m''p''$, $m'''p'''$, sont différentes pour chacun des liquides employés. Si, dans chaque tube, il reste un excès de liquide, et si la température est, par exemple, de 10°, on constate que la dépression est d'environ 3 millimètres avec l'eau, 24 millimètres avec l'alcool, etc. Ces dépressions mesurent la *force élastique* de la vapeur formée par chacun des liquides, comme elles mesureraient la force élastique d'un gaz introduit dans la chambre barométrique. — On peut donc dire que les liquides donnent naissance, dans le vide, à des vapeurs douées *d'une force élastique*, ou *tension*, comparable à celle des gaz.

272. Tension maximum des vapeurs saturantes. — Lorsque, dans l'expérience qui précède, il reste *un excès* de liquide en contact avec la vapeur, il est évident que la chambre barométrique contient autant de vapeur qu'elle en peut contenir, à la température de l'expérience : on dit alors que l'espace est *saturé*, ou que la vapeur est *saturante*.

Dans ces conditions, si l'on cherche à augmenter la force élastique de la vapeur, en diminuant l'espace qu'elle occupe, on constate que cette force élastique *reste constante* et qu'une partie de la vapeur se liquéfie. L'expérience se fait à l'aide du baromètre à cuvette profonde, que nous avons employé précédemment (*fig.* 110). — On introduit, dans la chambre bien purgée d'air, une quantité suffisante d'éther pour que, la tension de la vapeur ayant réduit la colonne de mercure à la hauteur MN′ (*fig.* 191), il reste encore une petite quantité d'éther liquide : on peut alors diminuer le volume occupé par la vapeur, en enfonçant

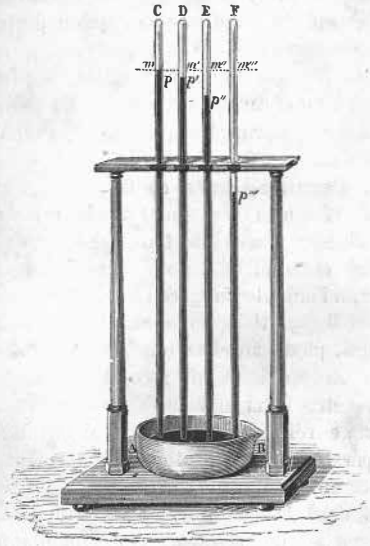


Fig. 190. — Force élastique des vapeurs dans le vide.

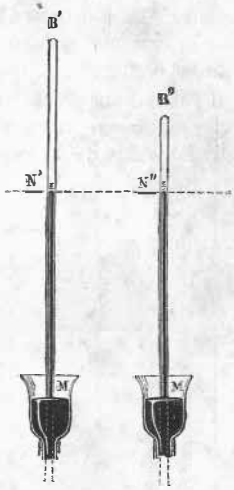


Fig. 191. Fig. 192.
Tension maximum des vapeurs saturantes.

le tube (*fig.* 192), *sans que la hauteur du mercure* MN″ *soit modifiée*. La vapeur avait donc acquis immédiatement, dans cet espace *saturé*, un *maximum de tension* qu'on ne peut lui faire dépasser : l'effet produit par la diminution de volume est simplement de faire revenir une partie de la vapeur à l'état liquide.

Inversement, si l'on soulève le tube de manière à augmenter le volume de la vapeur, on voit encore la hauteur de la colonne de mercure rester constante : donc la tension de la vapeur ne diminue pas, mais une nouvelle quantité d'éther se vaporise. — Il en est ainsi *tant que la vapeur reste saturante*.

273. Vapeurs non saturantes. — Supposons maintenant qu'on puisse augmenter suffisamment l'espace occupé par la vapeur, pour

qu'il *ne reste plus trace de liquide:* on observe alors, en continuant à soulever le tube, que la force élastique de la vapeur varie sensiblement en raison inverse de son volume. — Les vapeurs *non saturantes* suivent donc, au moins approximativement, la loi de Mariotte; les expériences précises montrent qu'elles s'en rapprochent d'autant plus qu'elles sont plus éloignées de leur point de saturation.

274. Influence de la température sur le maximum de tension. — Pour chaque liquide, le maximum de tension de la vapeur acquiert des valeurs croissantes à mesure que la température s'élève. — Pour le constater, il suffirait, dans l'expérience qui précède (*fig.* 190), d'entourer les tubes d'un manchon contenant de l'eau chaude, qu'on porterait successivement à diverses températures.

Pour la *vapeur d'eau*, en particulier, la connaissance des valeurs du maximum de tension à diverses températures offre un intérêt pratique considérable. Nous allons indiquer les procédés qui ont été employés pour les déterminer avec précision.

275 Tensions de la vapeur d'eau au-dessous de 0°. — Gay-Lussac a montré que la glace émet, au-dessous de 0°, des vapeurs ayant une tension sensible; il a mesuré cette tension, pour diverses températures, à l'aide de l'appareil suivant.

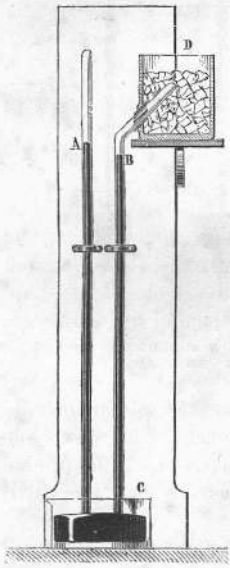


Fig. 193.

A et B (*fig.* 193) sont deux tubes barométriques, plongeant dans une même cuvette C; la partie supérieure du second est recourbée et pénètre dans le vase D, qui contient un mélange réfrigérant dont on détermine la température avec un thermomètre. On fait passer en B un peu d'eau : la vapeur se répand dans la chambre barométrique. Mais, une portion de cet espace étant maintenue à la température du mélange réfrigérant, à — 10°, par exemple, la vapeur ne peut y conserver une tension plus grande que celle qui correspond à — 10°; elle s'y congèle donc en partie, fait place à une nouvelle quantité de vapeur émise par le liquide, laquelle se congèle à son tour, et ainsi de suite, jusqu'à ce qu'il ne reste plus d'eau liquide au-dessus du mercure. A ce moment, le niveau dans le tube B se maintient encore au-dessous du niveau dans le tube sec : donc, à — 10°, la glace émet de la vapeur, dont la tension est mesurée par la distance verticale des niveaux A et B.

276. Tensions de la vapeur d'eau entre 0° et 100°. — Procédé de Dalton. — Pour déterminer la tension de la vapeur d'eau aux tempé-

ratures comprises entre 0° et 100°, Dalton employait deux baromètres, dont l'un A (*fig.* 194) contenait une petite colonne d'eau au-dessus du mercure, l'autre B était un baromètre ordinaire; les deux tubes plongeaient dans le mercure contenu dans une cuvette de fonte, et étaient entourés d'un manchon de verre rempli d'eau jusqu'en *mn*. — L'appareil étant porté à diverses températures au moyen d'un fourneau, on mesurait, à l'aide d'une règle divisée, la dépression du mercure dans le baromètre à vapeur, au-dessous du niveau dans le baromètre sec.

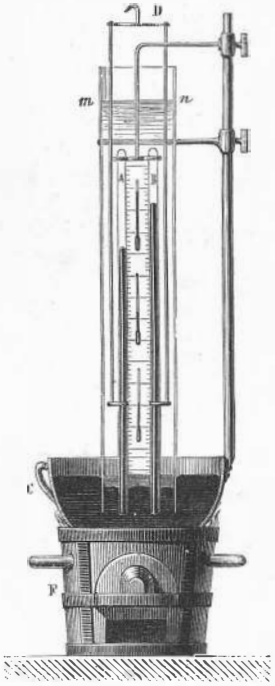


Fig. 194. — Appareil de Dalton.

Dans l'expérience ainsi faite, lorsqu'on arrive à la température de 100°, on constate que le mercure s'abaisse, dans le tube à vapeur, jusqu'au niveau du mercure dans la cuvette, c'est-à-dire que, *à la température de* 100°, *la force élastique de la vapeur d'eau est égale à la pression atmosphérique*. — Il en résulte que l'appareil de Dalton ne pourrait pas servir à déterminer les valeurs de la tension maximum de la vapeur d'eau à des températures supérieures à 100°.

277. Expériences de Regnault, pour la mesure des tensions de la vapeur d'eau entre 0° et 60°. — L'appareil de Dalton présente ce grave défaut, qu'il ne permet pas d'établir dans le bain liquide une température uniforme. Dalton avait soin d'agiter l'eau : mais, l'agitation se transmettant, par le mercure de la cuvette, aux colonnes barométriques, il fallait attendre quelques instants avant de faire la lecture des hauteurs : de là, des erreurs d'autant plus graves que, à des températures un peu élevées, de faibles variations de température entraînent des variations considérables dans la tension de la vapeur.

Regnault a remplacé la disposition de Dalton par la suivante. Le tube à vapeur AB et le tube barométrique sec A′B′ sont fixés dans des tubulures D et D′ pratiquées au fond d'une caisse de tôle CC′ (*fig.* 195), dont l'une des faces est fermée par une glace de verre; cette caisse contient de l'eau, qui environne les parties supérieures des tubes, et que l'on peut chauffer à l'aide d'un fourneau placé au-dessous.

Pour faire une observation, on relève, au cathétomètre, la différence des niveaux du mercure dans les deux tubes, et on lit la température

sur le thermomètre T. On corrige le résultat, en tenant compte de la dilatation du mercure (247), du poids de la petite colonne d'eau qui surmonte le mercure dans le tube à vapeur A′, et enfin des actions capillaires qui s'exercent dans les deux tubes.

Mais cet appareil ne peut guère être employé que jusqu'à 60°; dès que la force élastique de la vapeur est suffisante pour déprimer le mercure au-dessous du fond de la caisse, la vapeur n'étant plus tout entière à la température du bain, les indications de l'appareil n'ont plus de signification précise. Pour mesurer les tensions qui correspondent aux températures intermédiaires entre 60° et 100°, Regnault a employé un

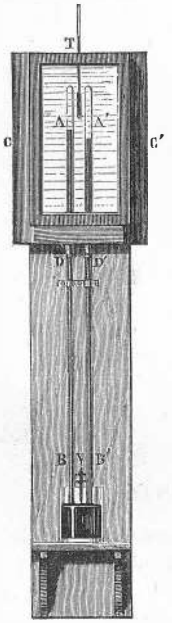


Fig. 195.
Tension de la vapeur d'eau entre 0° et 60°; appareil de Regnault.

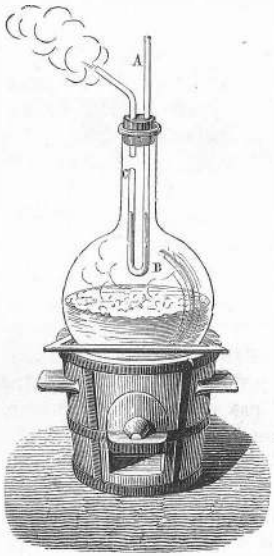


Fig. 196.

autre procédé, applicable également au-dessus de 100°, et que nous allons indiquer.

278. Expériences de Regnault, pour les températures comprises entre 50° et 100°, et pour les températures supérieures à 100°. — Le principe de la méthode est le suivant : *La force élastique de la vapeur émise par un liquide en ébullition est égale à la pression qui s'exerce sur sa surface.* — L'appareil de Dalton nous a déjà montré, en effet (276),

que la force élastique de la vapeur d'eau à 100°, c'est-à-dire la température où l'eau entre en ébullition à l'air libre, est égale à la pression de l'atmosphère. Le principe peut encore être vérifié, pour ce même cas particulier, par l'expérience suivante. — Un tube recourbé ABC (*fig.* 196), ayant la forme d'un petit tube de Mariotte, est d'abord rempli de mercure jusqu'au sommet de sa branche fermée C : on fait passer un peu d'eau dans cette branche, puis on suspend l'appareil dans un ballon contenant de l'eau, que l'on porte à l'ébullition. On voit la vapeur déprimer le mercure dans la branche fermée : quand la température est devenue uniforme, les niveaux du mercure arrivent à la même hauteur dans les deux branches. — La généralité du principe énoncé sera d'ailleurs établie plus loin, par l'étude du phénomène de l'ébullition lui-même.

L'un des appareils employés par Regnault est représenté par la

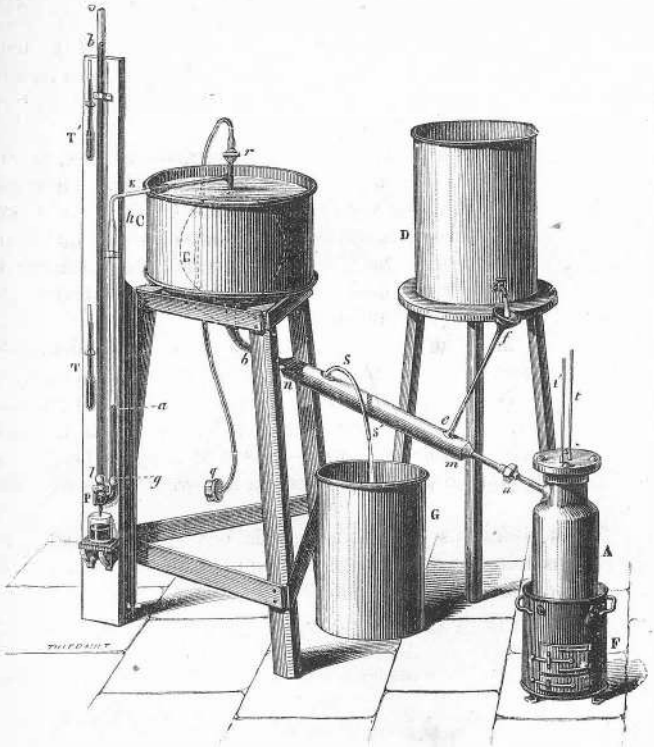


Fig. 197. Tensions de la vapeur d'eau aux températures élevées; appareil de Regnault.

figure 197. Une petite chaudière de cuivre A communique, par un tube incliné *ab*, avec un grand ballon métallique B dans lequel on peut raré-

fier ou comprimer de l'air à différentes pressions, en le mettant en communication, au moyen d'un tube de plomb, soit avec une machine pneumatique, soit avec un système de pompes de compression ; les pressions ainsi obtenues sont mesurées par le manomètre à l'air libre KPO. Le ballon est entouré d'une masse d'eau froide, qui maintient sa température constante. La vapeur formée par l'ébullition dans la chaudière passe dans le tube *ab*, refroidi par un courant d'eau qui parcourt le manchon *mn* : cette vapeur se condense, et retombe en eau dans la chaudière. — Or, d'après le principe précédent, lorsque l'ébullition a lieu régulièrement dans la chaudière, *la force élastique de la vapeur est égale à la pression que l'on a établie dans le ballon B*. Les observations se réduisent donc à noter, d'une part, la température donnée par un thermomètre plongeant dans la vapeur ; d'autre part, la force élastique mesurée par le manomètre à air libre. — Dans chaque expérience, la pression et la température conservant la même valeur pendant un temps à peu près indéfini, on peut faire plusieurs fois chacune des lectures, et s'assurer, par la constance des résultats ainsi obtenus, de la légitimité de la méthode.

Pour déterminer les tensions de la vapeur entre 50° et 100°, on raréfiait l'air dans le ballon B ; pour opérer à des températures supérieures à 100°, on comprimait l'air sous des pressions graduellement croissantes. — Pour les pressions considérables, on employait un appareil présentant une plus grande résistance ; le manomètre de la figure 197 était remplacé par le grand manomètre à air libre qui avait servi pour les recherches sur la loi de Mariotte (*fig.* 115).

279. Tables numériques. — Regnault a mesuré les valeurs de la tension maximum de la vapeur d'eau, à diverses températures comprises entre — 30° et + 236°. De ces nombres, fournis directement par l'expérience, il a déduit, par le calcul, les valeurs de la tension maximum, de degré en degré, entre — 30° et + 236°. — Ces tensions augmentent de plus en plus rapidement, à mesure que la température s'élève.

Les Tables ci-dessous sont un abrégé de celles de Regnault. On en trouvera plus loin une autre (page 244), qui est particulièrement destinée à l'étude du degré d'humidité de l'atmosphère

TENSION MAXIMUM DE LA VAPEUR D'EAU EN MILLIMÈTRES, ENTRE —30° ET 100°

TEMPÉRATURE.	TENSION en millimètres.	TEMPÉRATURE.	TENSION en millimètres.
—30°.	0^{mm},39	40°.	54^{mm},91
—20°.	0^{mm},95	50°.	91^{mm},98
—10°.	2^{mm},09	60°.	148^{mm},79
0°.	4^{mm},60	70°.	233^{mm},09
+10°.	9^{mm},16	80°.	354^{mm},64
20°.	17^{mm},39	90°.	525^{mm},45
30°.	31^{mm},55	100°.	760^{mm},00 (1 atm.)

TENSION MAXIMUM DE LA VAPEUR D'EAU, EN ATMOSPHÈRES, ENTRE 100° ET 526°

TEMPÉRATURE.	TENSION en atmosphères.	TEMPÉRATURE.	TENSION en atmosphères.
100°.	1 atm.	155°.	5 atm.
121°.	2 —	181°.	10 —
135°.	3 —	215°.	20 —
145°.	4 —	256°.	30 —

280. Tensions des vapeurs des divers liquides. — Regnault a encore appliqué les méthodes précédentes à la détermination des tensions des vapeurs saturantes d'un certain nombre de liquides. Le tableau ci-après contient quelques-uns des résultats obtenus.

Le mercure n'émet, aux températures ordinaires de l'atmosphère, que des vapeurs dont la tension est extrêmement faible. Dans les mesures barométriques et manométriques, effectuées à la température de l'atmosphère, il n'est donc pas nécessaire de tenir compte de la tension de la vapeur de mercure (*).

TENSION MAXIMUM DES VAPEURS DE QUELQUES LIQUIDES, EN MILLIMÈTRES DE MERCURE.

TEMPÉRATURE.	MERCURE.	ALCOOL.	SULFURE DE CARBONE.	ÉTHER.
—20°.	»	3mm	47mm	69mm
0°.	0mm,02	13	128	184
+20°.	»	45	302	433
40°.	0,mm12	134	617	908
60°.	»	330	1164	1729
80°.	»	813	»	3024
100°.	0mm,71	1698	3325	4955
120°.	»	3220	5145	7702
140°.	»	5657	7557	»

II. — MÉLANGE DES GAZ ET DES VAPEURS.

281. Les vapeurs acquièrent, dans les gaz, la même tension que dans le vide, à la même température. — Cette loi, énoncée par Dalton, peut se vérifier au moyen de l'expérience suivante, indiquée par Gay-Lussac.

Un large tube A (*fig.* 198), fermé à sa partie supérieure, et divisé en parties d'égales capacités, communique avec un tube manométrique B et avec un tube C, par l'intermédiaire du robinet *r*. L'appareil étant placé dans une position renversée, et le tube B étant bouché à son extrémité, on remplit l'appareil avec du mercure, que l'on introduit par

(*) Cependant les expériences de Merget ont montré que les vapeurs émises par le mercure peuvent encore être rendues sensibles jusqu'à — 44°, c'est-à-dire à une température inférieure à celle de sa solidification. En outre, les vapeurs de mercure, qui, à la température ordinaire, ont une tension très faible, se répandent cependant à une distance considérable du liquide qui les a produites : c'est ce que montre l'action de ces vapeurs sur des réactifs très sensibles, tels que les sels d'or ou d'argent.

le tube C; puis fermant le robinet *r*, on redresse l'appareil. — On met alors le tube B en communication avec l'air atmosphérique, par l'intermédiaire de tubes desséchants, et l'on ouvre le robinet *r* : le mercure du tube B s'écoule et le gaz pénètre bulle à bulle dans le tube A. Lorsqu'on en a introduit une quantité suffisante, on ferme le robinet, et l'on ramène le gaz à la pression de l'atmosphère, en versant du mercure par B; enfin, on note le volume occupé par le gaz.

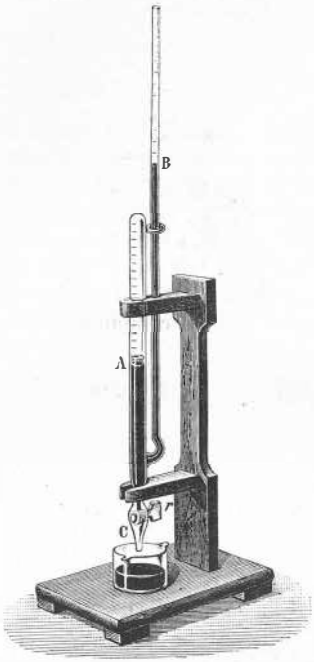


Fig. 198.
Mélange des gaz et des vapeurs appareil de Gay-Lussac.

On verse alors dans le tube B une petite colonne d'un liquide volatil, de l'éther par exemple, et l'on ouvre le robinet *r*, de manière à faire écouler le mercure des deux branches à la fois. Le niveau baisse plus rapidement dans le tube ouvert que dans le tube fermé, et à un instant donné, une partie du liquide qui surmonte le mercure de B s'engage dans le tube large, et s'élève à la surface du mercure qui reste dans A; on ferme alors le robinet *r*. A mesure que l'éther se vaporise, on observe que le niveau du mercure se déprime progressivement en A, tandis qu'il s'élève en B. Une fois la saturation atteinte, ce que l'on reconnaît à la constance des niveaux, on peut procéder à la mesure de la tension de la vapeur. Pour cela, on ramène le volume à ce qu'il était d'abord, en versant du mercure par la branche B, et l'on détermine la différence de hauteur des deux niveaux. — L'expérience montre qu'elle est précisément *égale à la force élastique de la vapeur du liquide dans le vide, à la même température.*

Il résulte d'expériences précises, faites par Regnault, que la vaporisation des liquides dans les gaz diffère simplement de la vaporisation dans le vide, en ce que le *point de saturation* n'est atteint qu'au bout d'un certain temps, souvent assez long.

282. Loi du mélange des gaz et des vapeurs. — L'expérience précédente montre que *la force élastique d'un mélange de gaz et de vapeur est égale à la somme des forces élastiques qu'auraient séparément le gaz et la vapeur, si chacun d'eux occupait seul le volume du mélange.* C'est une loi exactement semblable à celle du mélange des gaz (147).

La même loi s'appliquerait encore au cas où la vapeur ne serait pas saturante, car alors cette vapeur suivrait la loi de Mariotte, et se comporterait comme un gaz proprement dit.

III. — DENSITÉS DES VAPEURS.

283. Définition. — On appelle *densité* d'une vapeur, le *rapport entre les poids* (ou mieux, les masses) *de deux volumes égaux de vapeur et d'air, pris dans les mêmes conditions de température et de pression.*

Cette définition, semblable à celle de la densité d'un gaz proprement dit (255), suppose que la vapeur soit prise à une température assez éloignée de son point de liquéfaction pour qu'on puisse, sans erreur sensible, la regarder comme suivant à la fois la loi de Mariotte et la loi de Gay-Lussac. — Nous reviendrons plus loin sur les circonstances dans lesquelles on peut considérer cette condition comme réalisée (285).

284. Procédé de Dumas. — Le procédé le plus précis, pour la détermination des densités des vapeurs, est celui de Dumas.

On prend un ballon A (*fig.* 199), de 250 à 500 centimètres cubes de capacité, dont on étire le col en pointe fine. Le ballon étant *ouvert*, on

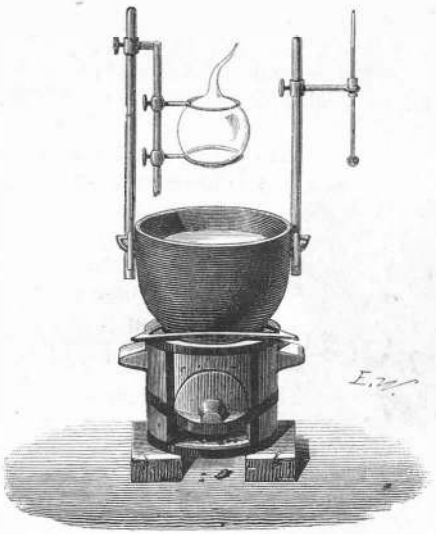


Fig. 199. — Détermination de la densité des vapeurs; procédé de Dumas.

le place sur l'un des plateaux d'une balance, en mettant à côté de lui un poids marqué, de 2 grammes par exemple, et on établit la tare

dans l'autre plateau. Le poids apparent de la tare est équilibré par ces 2^{gr}, et par le poids apparent du verre du ballon. — Puis, on introduit dans le ballon A une certaine quantité du liquide dont on cherche la densité de vapeur (*). On assujettit le ballon dans un support, comme le montre la figure, et on le fait plonger dans un bain d'huile ou d'alliage fusible, de manière à atteindre toujours une température très notablement supérieure au point d'ébullition du liquide intérieur. La vapeur s'échappe par la pointe effilée, sous la forme d'un jet, et entraîne avec elle l'air du ballon; lorsque le jet cesse de se produire, on ferme la pointe au chalumeau. On note à ce moment la température T du bain, et la pression atmosphérique H_1; on retire le ballon, on l'essuie, et on le reporte sur la balance. Supposons, pour fixer les idées, qu'il ait augmenté de poids; il faudra, pour rétablir l'équilibre, diminuer d'une certaine quantité p les 2 grammes placés à côté de lui. On note la température t du laboratoire et la hauteur barométrique H, au moment de cette seconde pesée. — Le poids apparent de la tare est alors équilibré par $(2 - p)^{gr}$, par le poids apparent du verre du ballon, et par le poids apparent de la substance contenue dans le ballon fermé, dans les conditions t et H de l'air ambiant au moment de cette seconde pesée. En négligeant la petite variation de poussée que le verre du ballon a pu éprouver en passant des conditions de la première pesée aux conditions de la seconde, on peut dire que p exprime l'excès du poids P_1 de la vapeur qui remplit le ballon à la température T et sous la pression H_1, sur le poids P de l'air que contiendrait ce même ballon à la température t et sous la pression H.

Pour trouver P, on détermine le volume intérieur du ballon. A cet effet, on plonge la pointe sous le mercure, et on la brise; la vapeur s'étant condensée, le mercure pénètre dans le ballon et le remplit. On verse ensuite ce mercure dans une éprouvette graduée, afin d'en mesurer le volume; ce volume, ramené à 0°, fait connaître la capacité intérieure V du ballon à la même température. On a donc :

$$P = V\,(1 + kt)\,0{,}001293\,\frac{H}{76}\,\frac{1}{1 + \alpha t}.$$

On en déduit le poids P_1 de la vapeur qui remplit le ballon à la température T et sous la pression H_1, savoir :

$$P_1 = p + V\,(1 + kt)\,0{,}001293\,\frac{H}{76}\,\frac{1}{1 + \alpha t}.$$

Il reste à trouver le poids P_2 de l'air que contiendrait le ballon dans les mêmes conditions de température et de pression; ce poids est

$$P_2 = V\,(1 + kT)\,0{,}001293\,\frac{H_1}{76}\,\frac{1}{1 + \alpha T},$$

(*) Pour cela, on chauffe légèrement le ballon, et on le laisse ensuite refroidir, en

et si l'on divise P_1 par P_2, le quotient exprime la densité cherchée.

MM. H. Sainte-Claire Deville et Troost ont appliqué la méthode de Dumas à la recherche des densités de vapeurs des liquides qui n'entrent en ébullition qu'à des températures très élevées. — Pour cela, ils ont employé des ballons de porcelaine, qu'ils plaçaient dans des étuves chauffées par de la vapeur de mercure, de soufre ou de cadmium, ces corps étant maintenus en ébullition sous la pression atmosphérique. L'avantage de ce mode de chauffage est de donner, pendant un temps aussi long qu'on le veut, une température bien connue, et dont la valeur reste rigoureusement constante.

285. Densités des vapeurs, dans les conditions où elles se comportent comme des gaz. — La densité d'*une même vapeur*, par rapport à l'air, lorsqu'on la détermine à des températures de plus en plus élevées, présente des valeurs de plus en plus faibles; mais ces valeurs diffèrent de moins en moins les unes des autres, et la densité, *au-dessus d'une certaine température*, devient *sensiblement constante*. — Donc, à partir de cette température, un certain volume de vapeur éprouve les mêmes variations qu'un égal volume d'air dans les mêmes circonstances de température et de pression; en d'autres termes, cette vapeur suit les lois de Mariotte et de Gay-Lussac (*).

Pour chaque vapeur, on réserve généralement le nom de *densité*, à cette *valeur limite* vers laquelle tendent les valeurs déterminées à des températures croissantes. — Le tableau suivant donne les densités de quelques vapeurs, ainsi définies.

	DENSITÉS DE VAPEURS.
Alcool	1,61
Eau	0,622
Éther	2,59
Iode	8,7
Mercure	6,97
Phosphore	4,35
Soufre	2,2

Parmi ces résultats, il est important de retenir, en vue des applications, celui qui est relatif à la vapeur d'eau, dont la densité est 0,622. — On emploie aussi la valeur $\frac{5}{8}$, qui diffère peu de la précédente.

286. Calcul du poids de vapeur d'eau contenu dans un volume déterminé d'air saturé à une température connue. — La tension de la vapeur d'eau étant la même dans l'air que dans le vide à la même température (281), on trouvera le poids p de la vapeur qui sature un

plongeant la pointe ouverte dans le liquide : la contraction de l'air, produite par le refroidissement, fait pénétrer une petite quantité de liquide dans l'appareil.

(*) Avant d'atteindre cette limite, certaines vapeurs éprouvent des variations de densités considérables. — Ainsi, d'après Cahours, la densité de la vapeur d'acide acétique à la température de 125° est 3,20; à la température de 250°, elle est seulement de 2,09. A partir de cette température, elle est sensiblement constante.

volume V d'air à la température de t degrés, en remplaçant, dans la formule générale établie précédemment (239), la densité D par 0,622, et la force élastique H par la tension maximum F de la vapeur d'eau à t degrés :

$$(1) \qquad p = V \times 0{,}001\,293 \frac{F}{76} \times \frac{1}{1 + \alpha t} \times 0{,}622,$$

ou encore, en employant la densité approchée $\frac{5}{8}$,

$$(1\ bis) \qquad p = V \times 0{,}001\,293 \times \frac{F}{76} \times \frac{1}{1 + \alpha t} \times \frac{5}{8}.$$

287. Calcul du poids total d'un volume déterminé d'air saturé de vapeur d'eau, à une température connue. — Le poids total P d'un volume V d'air saturé de vapeur d'eau se compose de deux parties : le poids p de la vapeur, et le poids p' de l'air supposé sec. Or, d'après la loi du mélange des gaz et des vapeurs, si l'on désigne par H la force élastique totale de l'air humide, celle de l'air supposé sec est H — F. La formule établie plus haut (239) donne donc le poids p', en y remplaçant D par l'unité, et H par H — F, ce qui donne :

$$p' = V \times 0{,}001\,293 \times \frac{H - F}{76} \times \frac{1}{1 + \alpha t}.$$

En ajoutant, à cette valeur de p', la valeur de p donnée par l'expression (1) et en remarquant que 1 — 0,622 = 0,578, il vient :

$$(2) \qquad P = V \times 0{,}001\,293 \times \frac{1}{1 + \alpha t} \frac{H - 0{,}578.F}{76}$$

Si l'on prend pour la valeur du poids p l'expression (1 *bis*), on a :

$$(2\ bis) \qquad P = V \times 0{,}001\,293 \times \frac{1}{1 + \alpha t} \times \frac{H - \frac{5}{8}F}{76}.$$

Cette dernière formule est très fréquemment employée.

Si V était exprimé en litres et P en grammes, il faudrait, dans ces formules, remplacer 0,001293 par 1.293.

CHAPITRE VII

DIVERS MODES DE FORMATION DES VAPEURS. CONDENSATION DES VAPEURS ET DES GAZ

I. — ÉVAPORATION.

288. Évaporation. — On appelle *évaporation*, la production de vapeur s'effectuant *à la surface libre* d'un liquide.

Quand l'espace où la vapeur peut se répandre est limité, que cet espace soit vide ou occupé par un gaz, nous avons vu que la vapeur cesse de se produire lorsqu'elle a acquis le maximum de tension correspondant à la température actuelle.

Si le liquide est placé à l'air libre, l'évaporation continue tant qu'il reste du liquide, et cela quelle que soit la température; mais elle est d'autant plus rapide que la *température* est plus élevée. — Ainsi, l'eau répandue sur le sol s'évapore plus vite en été qu'en hiver.

La production de vapeur est aussi d'autant plus abondante que la *surface libre* du liquide offre plus d'étendue. — C'est pourquoi, pour concentrer l'eau de mer, dans les marais salants, on la fait arriver dans des bassins présentant une grande surface.

L'*agitation de l'air* active encore l'évaporation, en entraînant la vapeur à mesure qu'elle se forme. — C'est pourquoi, dans les séchoirs, on a soin de déterminer des courants d'air.

Enfin, l'évaporation est d'autant plus rapide que l'espace environnant est plus éloigné de la saturation. Suivant Dalton, la quantité de vapeur qui se forme, en un temps donné, est *proportionnelle à l'excès de la tension maximum de la vapeur, pour la température actuelle, sur la tension de la vapeur qui existe dans l'atmosphère.* — Ce n'est là qu'une loi approximative, dont on peut faire usage dans les cas où la différence des deux tensions est peu considérable.

289. Froid produit par l'évaporation. — Lorsqu'un liquide s'évapore sans l'intervention d'aucune source de chaleur, il éprouve toujours un *abaissement de température.* — Mettons, par exemple, une couche de coton autour du réservoir d'un thermomètre, et mouillons le coton avec de l'éther; à mesure que l'éther s'évapore, on voit le ther-

momètre indiquer une température de plus en plus basse. Cela tient à ce que le passage de l'état liquide à l'état de vapeur exige, comme le passage de l'état solide à l'état liquide (256), l'absorption d'une certaine quantité de chaleur, qu'on appelle ici *chaleur de vaporisation;* dans le cas actuel, la vapeur emprunte cette chaleur au liquide lui-même, et abaisse ainsi progressivement sa température.

290. Expérience de Leslie. — Cryophore de Wollaston. — L'évaporation rapide de l'eau, dans un milieu sans cesse raréfié, peut abaisser sa température jusqu'à déterminer la *congélation* du liquide restant. — Cette expérience, qui est due à Leslie, s'effectue en plaçant quelques gouttes d'eau dans une petite capsule de liège noircie A (*fig.* 200), au-

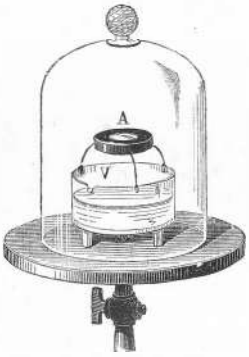


Fig. 200. — Expérience de Leslie.

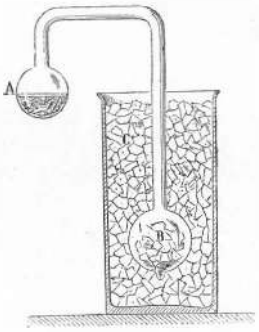


Fig. 201. — Cryophore de Wollaston.

dessus d'un vase V contenant de l'acide sulfurique, et sous le récipient de la machine pneumatique : on fait le vide aussi complètement que possible, et on ferme la clef de la machine. L'acide sulfurique continue d'absorber la vapeur d'eau à mesure qu'elle se produit, et concourt ainsi à activer l'évaporation : au bout de quelques minutes, on voit se former dans la capsule une petite lentille de glace.

Le *cryophore de Wollaston* (*fig.* 201) permet de produire la congélation de l'eau par évaporation, sans le secours de la machine pneumatique. — Deux boules de verre A et B sont réunies par un tube recourbé; la boule A contient de l'eau. En construisant l'appareil, on l'a purgé d'air, en faisant bouillir pendant quelque temps l'eau dans la boule A, avant de fermer à la lampe la pointe effilée qui termine la boule B. — Pour faire l'expérience, on entoure la boule B d'un mélange réfrigérant; il se produit alors une évaporation rapide à la surface de l'eau qui se trouve dans la boule A, parce que la vapeur, à mesure qu'elle se forme, vient se condenser dans la boule B. Au bout de quelques minutes, l'eau qui reste en A est congelée.

291. Appareil de M. Édouard Carré. — On doit à M. Édouard Carré un appareil fondé sur l'expérience de Leslie, et qui permet d'obtenir, en quelques minutes, une carafe d'eau glacée.

Une pompe P (*fig.* 202), semblable à la pompe à main qui a été décrite

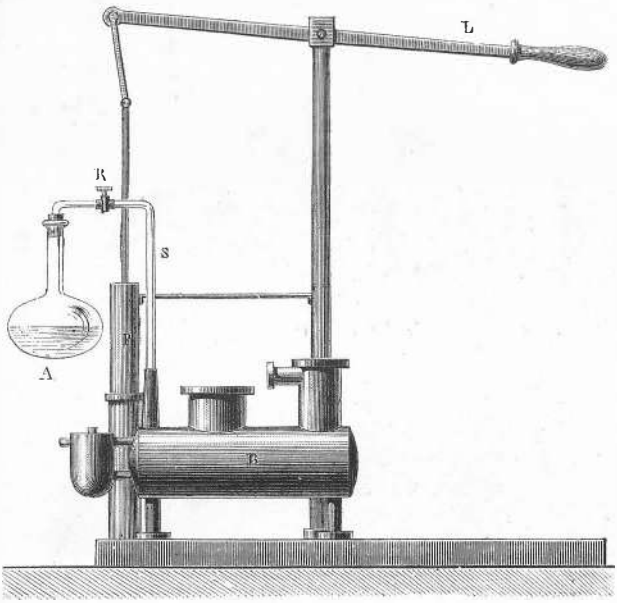


Fig. 202. — Appareil de M. Éd. Carré, pour la production de la glace.

(172), et dont on manœuvre la tige au moyen du levier L, communique avec un tube S, à l'extrémité duquel on adapte, au moyen d'un bouchon de caoutchouc, la carafe A qui contient l'eau. Une disposition particulière force les gaz aspirés par la pompe à traverser le cylindre B qui contient de l'acide sulfurique concentré, destiné à absorber la vapeur d'eau. — On fait d'abord le vide, aussi complètement que le permet la pompe, et on l'entretient ensuite en donnant de temps en temps quelques coups de piston : au bout de sept ou huit minutes, on voit se former de longues aiguilles de glace à la surface du liquide, et la congélation finit par envahir toute la masse.

292. Application de l'ammoniaque liquéfiée à la production de la glace. — Appareil de M. Ferdinand Carré. — Le refroidissement produit par la vaporisation de l'ammoniaque liquéfiée a été utilisé industriellement par M. Ferdinand Carré, pour obtenir des froids assez considérables.

La figure 205 représente un petit appareil de laboratoire, fondé sur ce principe. — Un cylindre métallique A contient une solution saturée d'ammoniaque, et communique par le tube *c* avec un récipient B. L'appareil étant hermétiquement clos, si l'on place le cylindre A sur un fourneau, le gaz ammoniac qui se dégage va se liquéfier en B : l'expérience montre que la solution a perdu tout son gaz quand le thermomètre *t* marque 120°. — On retire alors le cylindre A du feu, et on le plonge dans un seau d'eau froide : l'ammoniaque qui était liquéfiée en B se vaporise, et vient progressivement se redissoudre en A. Le froid produit en B est alors considérable ; de l'eau placée dans la cavité de ce récipient se congèle rapidement. — En enveloppant le récipient de flanelle, on peut même y maintenir, pendant une heure, une température de — 50°.

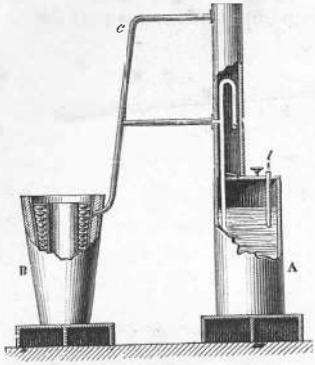


Fig. 205. — Production de la glace. Appareil de M. F. Carré.

L'appareil, restant invariablement clos, ne permet aucune déperdition de matière ; il peut être employé indéfiniment, sans autre dépense que celle du combustible.

M. Carré a construit, sur le même principe, de grands appareils dans lesquels la production de la glace s'effectue d'une manière continue.

293. Production des basses températures. — Le chlorure de méthyle, l'acide sulfureux, qui bout à — 10°, sont bien plus volatils que l'eau. Ils s'évaporent rapidement à l'air, et abaissent la température à — 20° ou — 30°. Quand on fait passer un courant d'air dans le liquide, l'évaporation est encore plus active et la température s'abaisse à — 50° ou — 60° : on peut alors congeler le mercure.

Par l'évaporation, dans le vide, de l'acide carbonique liquide, ou de l'éthylène liquide, on peut obtenir une température de — 140°, qui permet de congeler le sulfure de carbone et l'alcool.

II. — ÉBULLITION.

294. Phénomène de l'ébullition. — Quand une masse liquide est soumise à l'action continue d'un foyer de chaleur, il arrive, en général, qu'on voit apparaître, à un instant déterminé, des bulles de vapeur qui se forment au sein même du liquide, et viennent crever à sa surface. — C'est le phénomène de l'*ébullition*.

Ainsi, lorsqu'on place de l'eau sur le feu, on y voit apparaître d'abord de petites bulles très fines, qui s'élèvent à sa surface. C'est de l'air, qui était en dissolution dans l'eau, et qui se dégage. — Un peu plus tard, il se produit un murmure particulier, qu'on exprime en disant que *l'eau chante*. En même temps, on aperçoit au fond du liquide, des bulles plus grosses; mais elles apparaissent et disparaissent subitement, sans monter à la surface : ce sont des bulles de vapeur, qui se forment au contact de la paroi chauffée, mais qui se condensent brusquement dès qu'elles rencontrent des couches d'eau moins chaudes. C'est le mouvement alternatif imprimé à l'eau par la formation et la condensation de ces bulles, qui produit le murmure dont nous venons de parler. — Enfin, lorsque toute la masse de l'eau est arrivée à la température de 100°, le phénomène change. De grosses bulles s'élèvent dans le liquide (*fig.* 204), en lui imprimant une agitation tumultueuse, et viennent crever à sa surface libre : ces grosses bulles sont formées surtout par de la *vapeur d'eau*, qui se condense en un brouillard, au contact de l'air extérieur plus froid.

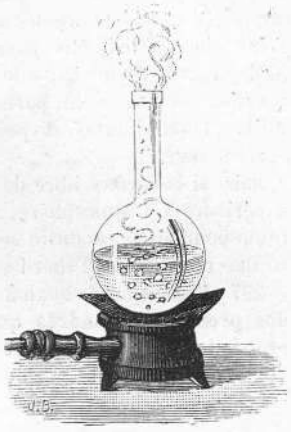


Fig. 204. — Ébullition de l'eau.

295. Lois de l'ébullition. — L'observation de thermomètres placés dans un liquide en ébullition et dans la vapeur que produit ce liquide conduit à formuler les deux lois suivantes :

1° *Pour un même liquide, placé dans les mêmes conditions, l'ébullition n'est possible qu'à partir d'une température déterminée.*

2° *Une fois l'ébullition commencée, si la pression reste la même, la température de la vapeur demeure invariable pendant toute la durée de l'ébullition.*

Mais c'est seulement par une étude attentive, qu'on a pu définir les *conditions* dont la réunion est nécessaire, pour que l'ébullition d'un même liquide se produise toujours à une même température. — Nous allons d'abord indiquer les résultats de cette étude.

296. L'ébullition d'un liquide ne peut s'effectuer à une température inférieure à celle pour laquelle la tension de sa vapeur est égale à la pression que supporte le liquide. — On voit, *a priori*, que si l'on imagine une bulle de vapeur formée au sein d'un liquide, elle ne pourra subsister à l'état gazeux qu'à la condition d'avoir une force élastique au moins égale à la pression qu'elle supporte de la part du liquide qui

la circonscrit. Or, si le liquide présente une surface libre, en contact avec un gaz, la pression en un point déterminé de sa masse est égale à la pression du gaz, augmentée de la pression due à la profondeur du point considéré au-dessous de cette surface. Donc, dans ce cas, l'ébullition ne doit être *possible*, que si la température est au moins égale à celle pour laquelle la tension de la vapeur est égale à la pression du gaz. — En particulier, pour l'eau en contact avec l'atmosphère, l'ébullition n'est *possible* que si la température est au moins égale à 100°.

Mais, si la surface libre de l'eau supportait une pression inférieure ou supérieure à 1 atmosphère, la température à partir de laquelle l'ébullition pourrait se produire serait inférieure ou supérieure à 100°. C'est ce que nous allons d'abord vérifier.

297 Ébullition de l'eau à des températures inférieures à 100°, sous des pressions moindres que 76^{cm}. — Sur les hautes montagnes, la pression étant beaucoup moindre que 76^{cm}, l'eau bout à des températures notablement inférieures à 100°; sur le mont Saint-Gothard, à 92°; au sommet du Mont Blanc, à 85° (*).

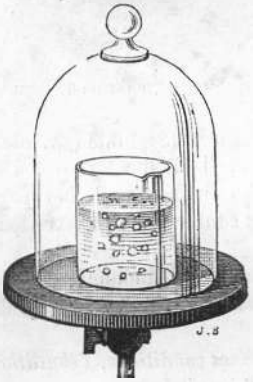


Fig. 205. — Ébullition de l'eau dans un espace raréfié.

L'expérience suivante n'est pas moins concluante. — On met de l'eau tiède (à 40 ou 45 degrés par exemple) dans un vase placé sous le récipient de la machine pneumatique (*fig.* 205). Quand on fait fonctionner la machine, il arrive un moment où, la pression sur la surface libre du liquide étant suffisamment diminuée, on voit l'eau entrer en ébullition. — Si l'on cesse de faire fonctionner la machine, l'ébullition s'arrête, parce que la vapeur dégagée vient accroître la pression.

Voici enfin une autre expérience, qui est due à Franklin. — Après avoir fait bouillir vivement de l'eau dans un ballon à long col, de manière que la vapeur chasse l'air du ballon, on le ferme avec un bouchon, et

(*) On peut mesurer approximativement la hauteur d'une montagne, en déterminant la température d'ébullition de l'eau au sommet, et cherchant, dans les tables de Regnault, quelle est la tension maximum de la vapeur d'eau à cette température. En effet, cette tension n'est autre que la pression barométrique, au point où l'expérience est faite. Il suffit donc de comparer cette pression à la pression barométrique au pied de la montagne, pour en déduire, comme il a été dit (151), la hauteur de la montagne elle-même. — On emploie, pour ces expériences, des thermomètres particuliers, dont le liquide ne commence à arriver dans la tige qu'à la température de 80° environ, et dont la tige est très capillaire, de façon qu'ils donnent en fractions de degré les températures comprises entre 80° et 100°.

on plonge l'extrémité du col dans un vase plein d'eau (*fig.* 206). — Au moment où l'on a retiré le ballon du feu, l'eau a cessé de bouillir. Mais, si l'on verse de l'eau froide sur la partie supérieure du ballon, de manière à condenser en partie la vapeur d'eau et à diminuer ainsi la pression intérieure, on voit se former dans le liquide de grosses bulles de vapeur, qui se dégagent en soulevant toute la masse.

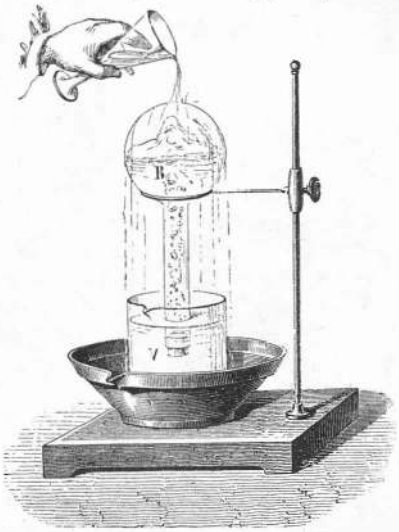


Fig. 206. — Expérience de Franklin.

Au contraire, quand on chauffe de l'eau dans un récipient clos, et qu'on laisse s'accumuler la vapeur qui se forme lentement à la surface du liquide, l'ébullition ne peut pas se produire, quoique la température s'élève bien au-dessus de 100°. — C'est ce que nous allons constater au moyen de la *marmite de Papin*.

298. Marmite de Papin. — La marmite de Papin se compose d'une petite chaudière cylindrique de bronze, à parois très résistantes (*fig.* 207), dans laquelle on introduit de l'eau, et que l'on ferme au moyen d'un couvercle solidement fixé par la vis V. Ce couvercle est muni d'une *soupape de sûreté s*, sur laquelle s'appuie un levier L, maintenu à l'une de ses extrémités et chargé à l'autre d'un poids P ; ce poids est réglé de façon que le levier puisse se soulever de lui-même et laisser échapper la vapeur, si la pression atteignait une dizaine d'atmosphères. — Lorsqu'on chauffe l'eau dans l'appareil clos, la vapeur qui se forme progressivement à la

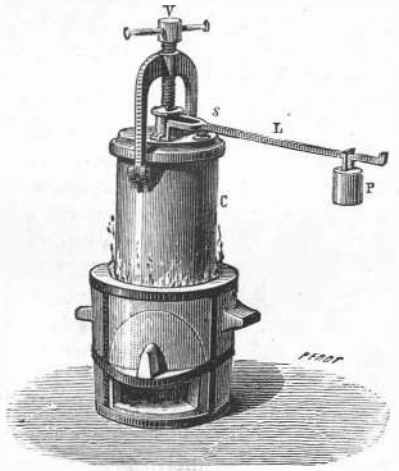


Fig. 207. — Marmite de Papin.

surface exerce, à chaque instant, une pression supérieure à la force élastique des bulles qui tendraient à se former au sein du liquide, et l'*ébullition est impossible*. — L'ébullition se prodnit brusquement dès qu'on ouvre la soupape,

299. Vaporisation totale. — Si l'on chauffe de l'eau, ou tout autre liquide, dans un récipient clos, à chaque instant la force élastique de la vapeur est égale à la tension maxima correspondante à la température actuelle; elle augmente donc de plus en plus rapidement à mesure que la température s'élève (279) : on peut se demander si, la force élastique augmentant au delà de toute limite, la rupture du récipient ne doit pas nécessairement se produire. — Les expériences de Cagniard de Latour ont établi que, dans ces conditions, il arrive un moment où ce liquide tout entier se réduit en vapeur, mais sans entrer en ébullition. Ce phénomène de *vaporisation totale* peut se produire même dans un tube dont la capacité ne serait que deux ou trois fois égale au volume nitial du liquide. Une fois le liquide totalement vaporisé, sa force élastique n'augmente plus que très lentement quand la température s'élève. — Les *températures de vaporisation totale*, déterminées par différents observateurs, sont : 365° pour l'eau, 230° pour l'alcool, 190° pour l'éther, 184° pour l'éther chlorhydrique, et 157° pour l'acide sulfureux.

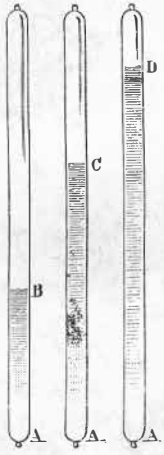


Fig. 208.

Une expérience facile à réaliser montre que l'acide carbonique liquide se vaporise totalement à 31°. — Dans un tube fermé, d'environ 30 centimètres de longueur, on a introduit de l'acide carbonique liquide (*fig.* 208). Quand le tube est entouré de glace fondante, la longueur AB de la colonne liquide est, par exemple, le tiers de celle du tube; le reste du tube est rempli d'acide carbonique gazeux, sous une pression de 30 atmosphères. On place le tube dans un bain d'eau à 20°, le niveau se déplace de B en C; la dilatation est considérable (225); la force élastique de la vapeur émise par le liquide est devenue 60 atmosphères. On réchauffe progressivement l'eau du bain jusqu'à ce que la température devienne 30°; le niveau s'élève jusqu'au point D; le volume du liquide est environ le double de ce qu'il était à 0°, et la force élastique du gaz est devenue environ 75 atmosphères. — A ce moment, la surface de séparation du liquide et du gaz est encore très nette; mais si l'on ajoute une petite quantité d'eau chaude, de manière que le thermomètre placé dans le bain marque 31°, on voit la surface de séparation devenir nuageuse, puis disparaître; la masse d'acide carbonique remplit complètement le récipient comme le ferait un gaz; il y a eu *vaporisation totale*.

300. Difficultés de l'ébullition dans une masse liquide entièrement privée de gaz. — Dans un tube de verre plusieurs fois recourbé, (*fig.* 209) et préalablement soumis à des lavages à l'alcool, à l'éther et à l'acide sulfurique, on introduit de l'eau distillée ; avant de fermer la pointe *m*, on chasse l'air par une ébullition prolongée, comme dans la construction du marteau d'eau (46) ; l'eau arrive ainsi à être en contact intime avec la paroi de verre, sans interposition de bulles d'air. — L'appareil étant ainsi préparé, on plonge la courbure ACD dans un bain de chlorure de calcium, dont on élève graduellement la température. Il semble que l'ébullition de l'eau du tube doive se produire à une température très basse, comme dans l'expérience de Franklin (*fig.* 206), puisque la surface libre n'est soumise qu'à la pression de la vapeur d'eau, qui est ici très faible ; cependant on peut amener la température de la partie chauffée jusque vers 135° sans qu'il y ait ébullition. Mais, quand on atteint cette haute température, on observe qu'il se produit tout à coup, en l'un des points du liquide, une bulle volumineuse de vapeur, soulevant toute la colonne et la projetant dans les boules, qui sont séparées par des étranglements destinés à amortir le choc. — Le même phénomène se reproduit, à des intervalles de quelques secondes, avec les mêmes caractères.

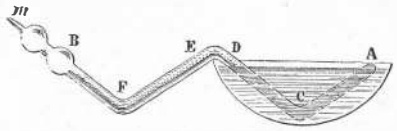


Fig. 209. — Expérience de Donny.

Cette expérience, qui est due à Donny, montre donc que, si un liquide ne contient, ni dans sa masse, ni sur son contour, *aucun gaz* interposé, il ne suffit pas, pour qu'il y ait ébullition, que sa température atteigne la valeur pour laquelle la tension de la vapeur serait égale à la pression exercée sur le liquide (*).

M. Louis Dufour est arrivé à la même conclusion, par un procédé semblable à celui qu'il avait employé pour produire la surfusion (259). — En introduisant des gouttes d'eau au sein d'un mélange d'huile de lin et d'essence de girofle, on obtient de petites sphères d'eau qui se tiennent en équilibre au milieu du liquide qui les environne, sans se mélanger avec lui. On constate qu'on peut élever leur température jusqu'à 178°, sans qu'il y ait ébullition. — Mais si l'on vient à toucher l'une de ces gouttes d'eau avec une baguette de verre ou de bois, l'ébullition s'y produit avec une extrême vivacité, et la goutte est projetée à une grande distance du corps solide. C'est là un fait dont nous donnerons l'explication un peu plus loin (302).

(*) Dans l'expérience que l'on vient de décrire, la tension de la vapeur correspondante à la température de 135° est d'environ 2300 millimètres, tandis que la surface du liquide supporte une pression de 15 à 20 millimètres ; la tension de la vapeur est donc plus de cent fois égale à celle qui serait rigoureusement nécessaire pour que ce dégagement eût lieu.

301. Influence de la présence d'un gaz, au sein d'une masse liquide, pour déterminer l'ébullition. — Expériences de M. Gernez. — Lorsqu'un liquide est parvenu à une température égale ou supérieure à celle qui donne à sa vapeur une tension égale à la pression extérieure, la présence d'un gaz, en un point de la masse liquide, *détermine l'ébullition* en ce point.

C'est ce que montre l'expérience suivante, qui a été imaginée par M. Gernez. — Un large tube de verre A (*fig.* 210), nettoyé préalablement à la potasse ou à l'acide sulfurique, et passé ensuite à l'eau bouillante, contient en B du sulfure de carbone, qui a été privé d'air, et que l'on couvre d'une couche d'eau C : le tube est placé dans un bain d'eau, contenu dans un grand ballon de verre, et dont un thermomètre T donne la température. C'est vers 48° que la tension de la vapeur de sulfure de carbone deviendrait égale à la pression atmosphérique : cependant on constate que l'on peut chauffer le ballon jusqu'à 60°, sans que l'ébullition du sulfure de carbone se produise. — On laisse alors tomber, par l'extrémité ouverte du tube A, une sorte de petite cloche de verre *v*, formée par un petit tube qu'on a effilé à l'une de ses extrémités : dès que cette petite cloche, arrivant dans le sulfure de carbone, apporte au milieu de la masse l'atmosphère d'air qu'elle contient, il se produit une ébullition tumultueuse. L'expérience offre ceci de frappant que la cloche, soulevée par la vapeur de sulfure de carbone, remonte dans la couche d'eau, et l'ébullition s'arrête : l'ébullition recommence dès que la cloche retombe, et ainsi de suite.

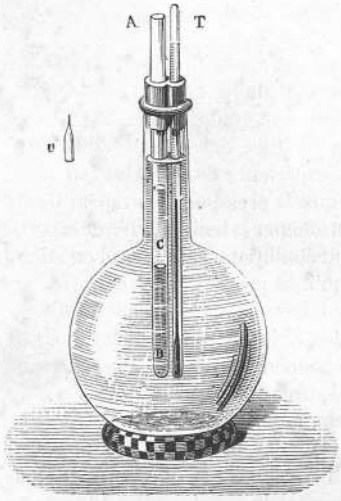


Fig. 210. — Expérience de M. Gernez.

302. Conséquences des faits qui précèdent, concernant les conditions du phénomène de l'ébullition. — En résumé, les expériences précédentes nous ont montré : 1° que, pour qu'un liquide puisse entrer en ébullition, il faut, avant tout, que sa température soit assez élevée pour donner à la vapeur une tension au moins égale à celle que supporte le liquide ; 2° que cette condition *nécessaire* n'est pas toujours *suffisante;* 3° que, si cette condition est remplie, la présence d'une masse gazeuse plus ou moins considérable, au sein même du liquide, détermine l'ébullition.

Ainsi, quand on fait bouillir de l'eau dans un vase quelconque, on

doit considérer les bulles d'air adhérentes à la paroi comme constituant, au sein du liquide, une sorte d'*atmosphère intérieure*, dans laquelle la vapeur peut se répandre par évaporation. Chacune des bulles augmente progressivement de volume, par l'addition incessante d'une nouvelle quantité de vapeur : si la température est suffisante, il arrive un moment où une partie de la bulle se détache, et vient crever à la surface libre du liquide. Mais, le départ de chaque bulle laissant encore après elle une partie du mélange gazeux adhérent à la paroi, des bulles nouvelles continuent à partir des mêmes points, et le phénomène peut se continuer régulièrement (*).

L'expérience montre cependant que l'ébullition, lorsqu'elle a duré longtemps dans un même vase, devient de plus en plus difficile; elle se fait par soubresauts, et la température *s'élève*. Ce résultat tient à ce qu'une longue ébullition finit par chasser les gaz qui étaient restés adhérents à la paroi. — On répète ordinairement dans les Cours l'expérience suivante, qui est due à Gay-Lussac. On fait bouillir de l'eau dans un ballon de verre, et, quand l'ébullition a duré quelque temps, on retire le ballon du feu; l'ébullition cesse, bien que la température soit en général de 101 ou 102 degrés. Si l'on projette alors dans cette eau un peu de limaille de fer, on voit un vif dégagement de bulles se produire; c'est l'air entraîné au sein du liquide, par la limaille elle-même, qui détermine la formation de la vapeur, la température ayant encore une valeur suffisante pour que la vapeur puisse se produire.

On conçoit aussi l'influence que doit avoir, dans les expériences de M. Dufour (500), le contact d'une baguette de verre avec les petites

(*) Une expérience due à M. Gernez montre combien est petite la quantité d'air intérieur qui suffit pour déterminer l'ébullition. Un ballon de verre à long col (*fig.* 211), préalablement lavé à l'acide sulfurique, contient de l'eau qu'on y a fait bouillir longtemps pour chasser toute trace d'air. On introduit dans cette eau une petite cloche de verre v, formée par l'extrémité d'un tube t, qu'on a étranglée à la lampe. — Lorsqu'on chauffe le ballon, on voit les bulles de vapeur se former exclusivement à l'orifice de la petite cloche v, et cela pendant un temps presque indéfini. Or, chacune de ces bulles entraîne avec elle une petite quantité d'air, et cependant M. Gernez a constaté qu'une bulle d'air, primitivement grosse comme une tête d'épingle, avait pu déterminer l'ébullition pendant vingt-quatre heures (l'eau vaporisée, se condensant sur les parois inclinées, retombait à la partie inférieure, ce qui permettait de prolonger l'expérience sans ajouter de l'eau). En comptant le nombre des bulles dégagées pendant quelques minutes, M. Gernez évalue à plus d'un demi-million le nombre de celles qui s'étaient formées aux dépens de cette petite quantité d'air, pendant la durée de l'expérience.

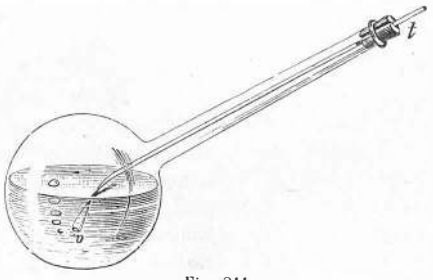


Fig. 211.

sphères liquides portées à une haute température : le verre apporte une certaine quantité d'air qui lui est restée adhérente, et qui fournit à la vapeur l'atmosphère gazeuse favorable à sa formation.

Enfin, dans la distillation de l'acide sulfurique, on évite les soubresauts qui rendent cette opération difficile dans des vases de verre, en plaçant dans l'acide, comme l'a indiqué M. Raoult, quelques fragments de *charbon de cornue;* les rugosités que ce corps présente, et qui retiennent des bulles d'air au milieu du liquide, facilitent la production des bulles de vapeur, dès le commencement de l'opération.

303 Ébullition des solutions salines — La présence de matières salines en dissolution dans un liquide donne lieu, en général, à une élévation de la température du liquide, au moment de l'ébullition ; l'élévation de température est d'autant plus considérable que la quantité de sel dissoute est plus grande.

Le tableau suivant indique la température du liquide en ébullition, sous la pression atmosphérique, pour quelques solutions de sels dans l'eau, chacune de ces solutions étant supposée *saturée* (les nombres de ce tableau correspondent donc à des quantités différentes des divers sels).

POINTS D'ÉBULLITION DE QUELQUES SOLUTIONS SATURÉES.

	POINTS D'ÉBULLITION.		POINTS D'ÉBULLITION.
Carbonate de soude. . . .	104°,6	Nitrate de soude.	121°,0
Chlorure de sodium. . . .	108°,4	Carbonate de potasse. . .	135°,0
Sel ammoniac.	114°,2	Nitrate de chaux.	151°,0
Nitrate de potasse. . . .	115°,9	Chlorure de calcium. . .	179°,5

Ces températures sont celles que marqueraient des thermomètres immergés dans les solutions au moment de l'ébullition ; dans tous les cas, la vapeur d'eau qui se dégage est à 100°.

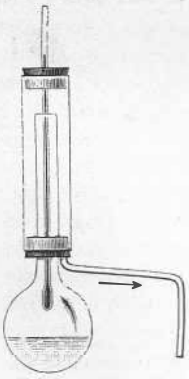


Fig. 212.

304. Détermination expérimentale du point normal d'ébullition d'un liquide. — D'après tout ce qui précède, il faut entendre par *point d'ébullition* d'un liquide, *sous une pression déterminée*, la température *minima* à laquelle ce liquide, supposé pur, puisse bouillir sous cette pression. — Nous désignerons, en particulier, par *point normal d'ébullition*, la température *minima* à laquelle l'ébullition puisse avoir lieu *sous la pression normale*, c'est-à-dire sous une pression représentée par 76 centimètres de mercure.

Or, si l'on cherchait à déterminer cette température en plaçant un thermomètre dans le liquide lui-même, on aurait toujours à craindre l'influence, soit d'une

expulsion plus ou moins complète des gaz, soit de la présence de sels en dissolution. — Mais l'expérience a montré que, quelle que soit l'influence de ces causes sur l'ébullition, un thermomètre placé *dans la vapeur elle-même, à une petite distance de la surface du liquide*, indique une température constante, sous une pression déterminée. — C'est donc dans ces conditions qu'on doit se placer.

La disposition indiquée par M. Berthelot (*fig.* 212) est particulièrement commode pour déterminer le point normal d'ébullition d'un liquide, lors même que celui-ci contiendrait quelque substance solide en dissolution. La vapeur monte dans le col du ballon, et redescend autour du col; le thermomètre est donc préservé de tout refroidissement. On note la température stationnaire au moment de l'ébullition.

Le tableau suivant donne les points normaux d'ébullition de quelques liquides, sous la pression de 76 centimètres.

	POINTS D'ÉBULLITION NORMAUX.		POINTS D'ÉBULLITION NORMAUX
Acide nitrique monohydraté.	86°	Eau.	100°
— nitrique ordinaire.	123	Essence de térébenthine.	157
— sulfureux.	—8	Éther chlorhydrique.	11
— sulfurique	326	— nitreux.	21
Alcool absolu.	78,5	— sulfurique.	35,5
— méthylique (esp. de bois).	66	Mercure.	360
Benzine.	80	Soufre	440
Chloroforme	63,5	Sulfure de carbone.	48

305. Chaleur de vaporisation. — La constance de la température, pendant toute la durée de l'ébullition, conduit à une conclusion semblable à celle qui a été énoncée relativement à la fusion (256).

En effet, la température restant invariable pendant toute la durée de l'ébullition, toute la chaleur fournie par la source est employée uniquement à produire le changement d'état, sans élévation de température. On désigne cette chaleur sous le nom de *chaleur latente de vaporisation*, ou simplement *chaleur de vaporisation*. — Nous reviendrons plus loin sur la mesure de cette quantité de chaleur (351).

III. — CALÉFACTION.

306. Phénomènes de caléfaction. — On sait, par une expérience vulgaire, que, lorsqu'on projette un peu d'eau sur une plaque métallique chauffée au rouge, on voit l'eau rouler à la surface de la plaque, en gouttes arrondies, et se convertir lentement en vapeur.

Chauffons, sur une bonne lampe à alcool ou sur un bec de gaz, une plaque métallique légèrement concave BB (*fig.* 215), et quand elle sera parvenue au rouge sombre, laissons-y tomber quelques gouttes d'eau.

Nous verrons le liquide se rassembler en une petite masse arrondie, qui restera soumise à une agitation continuelle, mais *sans entrer en ébullition :* elle ne disparaîtra qu'au bout de quelques minutes, par une *évaporation* successive.

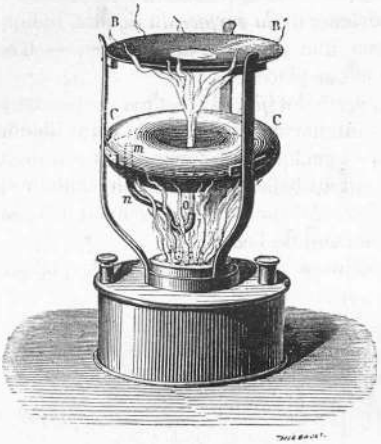


Fig. 215. — Caléfaction.

Ce phénomène, tout à fait anormal au premier abord, a été désigné sous le nom de *caléfaction*, avant qu'on se fût rendu un compte exact des circonstances dans lesquelles il se produit.

307. Explication de la caléfaction. — Le phénomène de la caléfaction se rattache aux lois générales de la formation des vapeurs.

Et d'abord, on peut constater que le liquide caléfié *ne touche pas* la surface chaude au-dessus de laquelle il se trouve. — En employant une capsule percée de trous assez grands pour laisser passer le liquide à froid, on observe que le liquide caléfié ne traverse pas ces ouvertures, ce qui prouve qu'il ne touche pas la capsule. — En produisant la caléfaction de l'eau sur une plaque métallique plane et bien horizontale, et disposant en arrière la flamme d'une bougie, on aperçoit la lumière entre le globule d'eau et la plaque (*).

En second lieu, la température du liquide caléfié reste *inférieure à sa température d'ébullition.* — C'est ce que M. Boutan a constaté directement, pour l'eau, en y introduisant un petit thermomètre : la température reste toujours inférieure à 100° (**).

Ces deux points étant établis, voici comment on peut interpréter le phénomène de la caléfaction. La surface solide étant à une température où la vapeur du liquide possède une tension considérable, il se forme, entre cette surface et le liquide, une couche de vapeur qui maintient

(*) Lorsque le doigt est mouillé avec de l'alcool ou de l'éther, on peut le tremper dans une masse de plomb fondu, sans éprouver autre chose qu'une sensation de fraîcheur ; on peut même, avec la main humide, couper impunément un jet de fonte en fusion, à sa sortie d'un haut fourneau.

(**) On fait encore, dans les Cours, l'expérience suivante, dont le résultat est saisissant. — Dans un creuset d'argent, chauffé au rouge, on verse de l'acide sulfureux *liquide*, dont le point d'ébullition est — 8° : le liquide se caléfie ; si alors on verse dans le creuset une petite couche d'eau, elle se transforme immédiatement en glace, au contact de l'acide sulfureux, dont la température est restée inférieure à — 8°.

entre eux une distance sensible. Dès lors, le liquide ne reçoit la chaleur du corps solide que par rayonnement : il s'échauffe beaucoup moins vite que s'il y avait contact, et n'émet de vapeur que par sa surface, sans qu'il y ait ébullition à l'intérieur.

Au contraire, si la surface solide vient à éprouver un abaissement de température, de manière que la couche de vapeur interposée ne puisse plus maintenir le liquide à distance, le contact s'établit entre la surface solide et le liquide : il se produit alors une vive ébullition, et le liquide se convertit instantanément en vapeur.

308. Intervention des phénomènes de caléfaction dans certaines explosions de chaudières à vapeur. — L'expérience suivante, due à Boutigny, paraît expliquer comment l'explosion d'une chaudière à vapeur peut se produire au moment où sa température s'abaisse, ainsi que la pratique l'a quelquefois montré. — Une petite chaudière de cuivre A (*fig.* 214) est chauffée jusqu'à une température voisine du rouge, au moyen d'une lampe L : on y projette un peu d'eau, et on la ferme avec un bon bouchon. L'eau se caléfie d'abord au fond de la chaudière; mais si l'on éloigne la chaudière de la flamme, comme le représente la figure, il arrive un moment où le liquide se réduit brusquement en vapeur : le bouchon est alors violemment projeté.

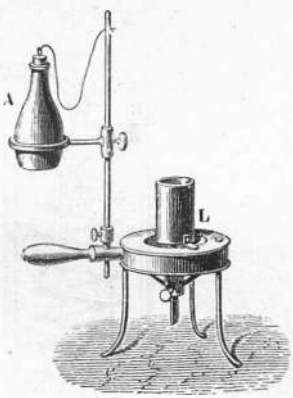


Fig. 214.

Or, dans les chaudières qu'on alimente avec des eaux chargées de sels calcaires, il se forme souvent des dépôts assez épais et peu conducteurs de la chaleur; les parois métalliques, chauffées directement par le fourneau, peuvent alors arriver à la température rouge. Si maintenant le dépôt calcaire vient à se détacher en certains points, l'eau, en rencontrant les parois incandescentes, doit éprouver d'abord la caléfaction; puis, quand plus tard la température s'abaisse, cette eau donne brusquement naissance à une quantité de vapeur qui peut déterminer l'explosion de la chaudière (*).

(*) Il est probable qu'une cause bien plus fréquente encore de l'explosion des chaudières à vapeur est la suivante. — Lorsque le travail d'une machine à vapeur est interrompu pendant quelque temps, on n'éteint généralement pas pour cela le feu; la machine étant alors au repos, la pompe alimentaire cesse d'introduire dans la chaudière de nouvelles quantités d'eau, en sorte que l'eau qu'elle renferme peut arriver à un état de *surchauffe*, par la perte du gaz qu'elle contenait. Au moment de la reprise du travail, l'arrivée de l'eau d'alimentation, qui est aérée, peut déterminer une ébullition tumultueuse et une explosion.

IV. — LIQUÉFACTION DES VAPEURS ET DES GAZ.

309. Liquéfaction des vapeurs. — Distillation. — On réserve ordinairement le nom de *vapeurs* aux fluides élastiques provenant de la vaporisation des substances qui sont liquides aux températures ordinaires. Il suffit, pour condenser ces vapeurs, de les faire rendre dans des appareils environnés d'eau froide. — C'est sur ce principe qu'est fondée la *distillation*, qui sert à séparer les liquides volatils des matières étrangères avec lesquelles ils étaient mélangés.

L'appareil employé pour la distillation de l'eau dans les laboratoires (*fig.* 215) porte le nom d'*alambic*. Il se compose : 1° d'une *chaudière* A,

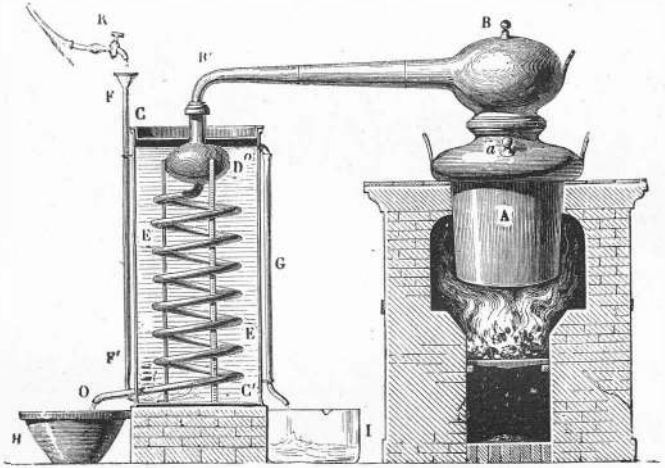


Fig. 215. — Alambic.

dans laquelle on introduit de l'eau qu'on fera bouillir sur un fourneau ; 2° d'un réservoir C appelé *condenseur*, qui contient de l'eau froide, et au milieu duquel se trouve un tube EE, enroulé en spirale, qu'on nomme le *serpentin*. La vapeur d'eau, arrivant de la chaudière dans le serpentin, se condense au contact des parois froides de ce tube ; l'eau provenant de la condensation s'écoule par l'extrémité O. — Pendant l'opération, l'eau du condensateur s'échauffe rapidement, parce que la vapeur, en se condensant, abandonne sa chaleur de vaporisation : un tube FF amène continuellement, au fond du réservoir, l'eau froide fournie par un robinet R ; à mesure que cette eau s'échauffe, elle gagne la partie supérieure du réservoir et s'écoule par le tube G.

Les eaux de source ou de rivière, qui contiennent toujours en dissolution diverses matières étrangères, donnent, par la distillation, de l'eau pure.

310. Liquéfaction des gaz. — On réserve généralement le nom de *gaz* aux corps qui se présentent sous la forme de *fluides élastiques* dans les conditions ordinaires de température et de pression. Tels sont, l'oxygène, l'hydrogène, l'acide sulfureux, l'acide carbonique, etc. — Or, puisque les vapeurs *non saturantes* possèdent les propriétés générales des gaz, et puisque ces vapeurs peuvent être ramenées à l'état liquide, on devait se demander si les gaz eux-mêmes ne pourraient pas être liquéfiés. — Les procédés à employer étaient indiqués par ceux mêmes qui servent à liquéfier les vapeurs.

311. Liquéfaction des gaz par simple refroidissement. — Une vapeur non saturante étant prise à une température T et à une pression P, si on la refroidit à une température t, assez peu élevée pour que la tension maximum correspondante f soit inférieure à P, une partie de cette vapeur se liquéfie, jusqu'à ce que la pression devienne égale à f. — On pouvait donc penser que, en faisant passer les gaz dans des tubes environnés de *mélanges réfrigérants*, on parviendrait à liquéfier au moins certains d'entre eux.

Le premier gaz qui ait été ainsi liquéfié est l'acide sulfureux; il fut obtenu liquide par Monge et Clouet, vers la fin du XVIII^e^ siècle. — Dans les laboratoires, on fait passer d'abord l'acide sulfureux, au sortir du ballon où il se produit, dans un tube renfermant du chlorure de calcium, pour dessécher le gaz; puis, dans un petit ballon entouré d'un mélange de glace et de sel marin. A la température de — 8°, le gaz se liquéfie sous la pression atmosphérique.

Le même procédé a été appliqué, par Guyton de Morveau, à la liquéfaction du gaz ammoniac; mais il faut employer alors un mélange réfrigérant formé de neige et de chlorure de calcium.

312. Liquéfaction des gaz par simple compression. — De la vapeur d'éther, non saturante, étant introduite dans un espace limité, on peut, en réduisant progressivement l'espace qu'elle occupe, l'amener d'abord à devenir saturante, et ensuite en liquéfier une portion de plus en plus grande (272). — On pouvait penser que, en réduisant l'espace occupé par une masse gazeuse, ou, ce qui revient au même, en faisant pénétrer dans un espace clos une masse de gaz de plus en plus grande, on parviendrait à produire la liquéfaction.

Fig. 216.
Liquéfaction du gaz ammoniac.

En 1824, Davy et Faraday eurent recours au procédé suivant. — Dans l'une des branches d'un tube de verre très résistant (*fig.* 216), celle de droite par exemple, on a préalablement introduit les matières destinées à produire le gaz, puis on a

fermé à la lampe l'autre extrémité. On chauffe les matières contenues dans cette branche, de manière à déterminer la réaction : le gaz, se dégageant dans un espace limité, acquiert bientôt la tension qui correspond à la saturation de cet espace ; à partir de ce moment, la liquéfaction commence. Si l'on plonge la branche de gauche dans la glace, le liquide volatil distille de la partie la plus chaude vers la plus froide, et vient s'y rassembler rapidement. — C'est la méthode de liquéfaction que l'on indique, dans les Cours de chimie, pour le gaz ammoniac, le cyanogène, le chlore, l'acide sulfhydrique, etc. — Melsens a utilisé, dans le même appareil, la propriété que possède le charbon d'absorber les gaz à la température ordinaire, et de les dégager ensuite par une élévation de température.

En partant du même principe, Thilorier construisit, en 1854, un appareil qui a été longtemps employé pour obtenir plusieurs litres d'acide carbonique à l'état liquide et même à l'état solide.

La pompe de M. Cailletet (*fig.* 217) peut servir à réaliser très facilement la liquéfaction de l'acide carbonique, du protoxyde d'azote, et de quelques autres gaz, sous des pressions qui ne dépassent pas 50 atmosphères. — Dans le corps de pompe B, glisse un piston plongeur A, surmonté d'une petite quantité de mercure ; le gaz est admis dans ce corps de pompe par l'orifice ●, non plus par une soupape, mais par un robinet R, ouvert et fermé alternativement par des cames reliées au volant de la machine. Le gaz comprimé au-dessus du piston soulève à la partie supérieure une soupape d'ébonite, et se rend par le tube T dans un récipient refroidi P. — L'introduction du mercure dans la pompe présente le double avantage de supprimer l'espace nuisible, et de répartir entre les différentes pièces, par le déplacement du mercure, l'échauffement qui est dû à la compression ; en fait, l'échauffement est insensible.

313. Liquéfaction des gaz par compression et abaissement de température réunis. — En employant simultanément la compression et le refroidissement, on devait espérer liquéfier des gaz qui avaient résisté à chacun des deux procédés employés séparément.

En 1845, Faraday employa, comme mélange réfrigérant, une pâte formée d'acide carbonique solide et d'éther : il put ainsi refroidir, à une température inférieure à — 100°, les tubes dans lesquels il comprimait les gaz, à l'aide de pompes foulantes, jusque vers 50 atmosphères. — Il parvint ainsi à obtenir, à l'état liquide, l'éthylène, l'hydrogène phosphoré, qui n'avaient pas encore été liquéfiés.

314. Température critique. — Liquéfaction des gaz réputés permanents. — Jusqu'à la fin de l'année 1877, six gaz avaient résisté à toutes les tentatives faites pour les liquéfier, savoir : l'hydrogène, l'oxygène, l'azote, le bioxyde d'azote, l'oxyde de carbone, et le gaz des marais (protocarbure d'hydrogène). — Ces gaz avaient reçu le nom de *gaz permanents*.

Un principe nouveau, énoncé et démontré par le physicien écossais Andrews, vint indiquer de quelle façon on devait modifier les procédés employés, pour arriver à liquéfier ces gaz. — Les expériences de Cagniard de Latour, déjà anciennes, et auxquelles on n'avait pas attaché assez d'importance, avaient montré que l'éther, par exemple, se vapo-

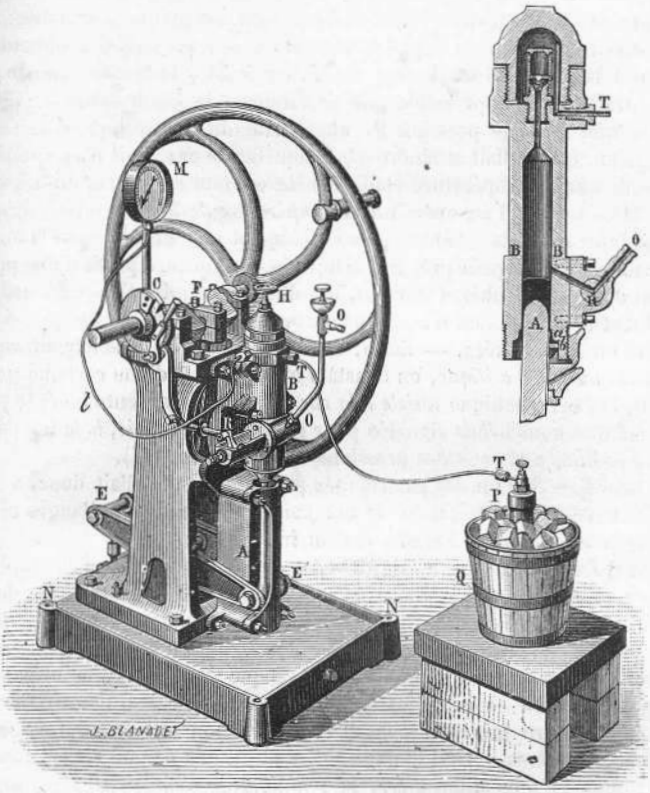


Fig. 217. — Pompe de M. Cailletet, pour la liquéfaction des gaz.

rise totalement, sans augmenter de volume, à la température de 190°; ce corps ne peut donc exister à l'état liquide si la température surpasse la *température de vaporisation totale*. En d'autres termes, la vapeur d'éther, à une telle température, n'est pas liquéfiable par simple compression. — D'une manière générale, les expériences de Cagniard de Latour faisaient pressentir qu'*il existe, pour chaque vapeur, et par conséquent pour chaque gaz, une température particulière, au-dessus de*

laquelle la liquéfaction est impossible, quelle que soit la pression exercée. Cette température, qui n'est autre que la température de vaporisation totale du corps à l'état liquide (299), a été appelée *température critique* ou *point critique.*

Ce principe a été démontré expérimentalement par Andrews, en opérant sur l'acide carbonique — Une masse déterminée d'acide carbonique était comprimée à une température maintenue constante; on mesurait les volumes décroissants, sous des pressions croissantes. Quand la température *t* était *inférieure à* 31°, la masse gazeuse se montrait plus compressible que ne l'indique la loi de Mariotte (156); sous une certaine pression P, une partie du gaz se liquéfiait. Cette pression, qu'il fallait atteindre pour liquéfier le gaz, était d'autant plus grande que la température était plus élevée, tout en restant au-dessous de 31°. — Quand on opérait *à la température de* 31°, on observait que le volume diminuait d'abord plus rapidement que ne l'indique la loi de Mariotte, comme pour préparer la liquéfaction; mais, à partir d'une pression de 80 atmosphères environ, le volume ne diminuait plus sensiblement et la liquéfaction n'avait pas encore lieu, même sous des pressions extrêmement élevées. — Enfin, aux températures notablement *supérieures au point critique,* on constata que, à partir d'une certaine pression, le gaz carbonique *résiste à la compression;* il présente alors la propriété que nous avons signalée pour l'azote ou pour l'air, à la température ordinaire et sous des pressions considérables (157).

Pour liquéfier un des gaz réputés permanents, il fallait donc, avant tout, le refroidir *au-dessous de son point critique.* Les mélanges réfrigérants employés par Faraday étaient insuffisants.

315. Expériences de M. Cailletet. — Un artifice particulier, employé par M. Cailletet, permit d'arriver à ce résultat. Voici le principe de la méthode employée. — Si l'on prend un gaz fortement comprimé dans un espace clos, et si l'on augmente brusquement son volume, de manière à lui faire éprouver une diminution brusque de pression, cette *détente* a pour effet un abaissement de température. Le calcul montre que, si la température initiale est 0°, et si la pression initiale est voisine de 500 atmosphères, quand le gaz se détend jusqu'à ce que la pression ne soit plus qu'une atmosphère, la température doit s'abaisser jusqu'à — 200°. C'est l'effet inverse de celui que nous avons constaté dans le briquet à air par la compression brusque. (*Note* de la page 20.)

C'est à ce procédé que M. Cailletet a eu recours pour faire apparaître à l'état liquide les gaz qu'on avait considérés jusque-là comme permanents. — Supposons qu'il s'agisse, par exemple, du bioxyde d'azote. On introduit le gaz dans un tube de verre à parois très résistantes TT, assujetti dans une cuvette de fonte B, au moyen d'un écrou de bronze A (*fig.* 218). La partie supérieure de l'éprouvette, très étroite, est contenue dans un manchon de verre M, où l'on peut placer soit de l'eau

roide, soit un mélange réfrigérant. La cuvette B contient du mercure; au moyen d'une presse hydraulique (non représentée sur la figure), on refoule de l'eau sur le mercure de la cuvette, de manière à réduire progressivement le volume occupé par le gaz dans le tube. Un manomètre adapté à la presse hydraulique fait connaître la pression que supporte le gaz. — L'eau du manchon étant à 8°, on constate que le bioxyde d'azote ne se liquéfie pas, même sous une pression de plusieurs centaines d'atmosphères ; le point critique de ce gaz est donc inférieur à 8°. — Mais, le gaz étant à 8°, et comprimé à environ 250 atmosphères, si l'on supprime brusquement la pression, de manière à produire une *détente*, le tube se remplit *pendant quelques instants* d'un brouillard, annonçant que la liquéfaction s'est produite.

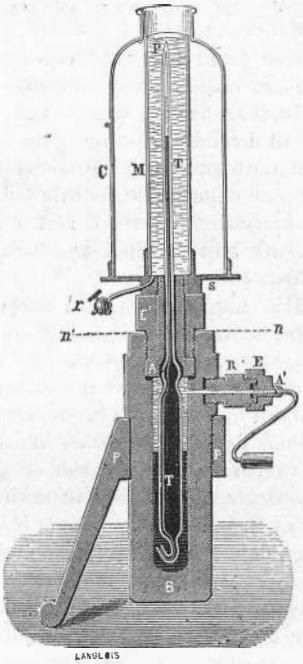


Fig. 218. — Appareil de M. Cailletet pour la liquéfaction des gaz par détente.

Cette méthode élégante a permis à M. Cailletet, en 1878, de faire également apparaître à l'état liquide *tous les autres gaz réputés permanents*, l'oxygène, l'hydrogène, l'azote et le gaz des marais (*).

L'appareil de M. Cailletet peut d'ailleurs servir à répéter les expériences d'Andrews, et parfois à déterminer le point critique avec exactitude. — Quand l'eau du manchon est portée au-dessus de 31°, il est impossible de liquéfier, *par compression*, l'acide carbonique renfermé dans le tube TT. Si l'on refroidit le bain un peu au-dessous de 31°, la compression poussée jusque vers 75 atmosphères entraîne la liquéfaction d'une partie du gaz. La température de 31° est

(*) A la même époque, M. Pictet parvenait à liquéfier l'oxygène et l'hydrogène, par un procédé tout différent de celui de M. Cailletet.

L'oxygène, produit par la décomposition du chlorate de potasse dans un obus en fer forgé, se rendait dans un long tube de fer, entouré d'un manchon rempli d'acide carbonique liquide, dont on activait l'évaporation au moyen de pompes : la température descendait jusqu'à — 140°. Dès que la pression atteignait une certaine valeur, l'oxygène commençait à se liquéfier. En ouvrant un robinet qui terminait le tube de fer, on voyait se produire un jet de gaz, d'une extrême violence; en éclairant ce jet à la lumière électrique, on y pouvait distinguer des particules liquides. — Pour liquéfier l'hydrogène, on préparait ce gaz au moyen d'un mélange de formiate de potasse et d'hydrate de potasse.

donc la température critique de l'acide carbonique. — Parmi les gaz réputés permanents, il en est un, le bioxyde d'azote, dont le point critique est voisin de 0°. On peut, en effet, obtenir la liquéfaction de ce gaz, en entourant le tube d'un mélange réfrigérant qui abaisse la température jusque vers — 10°, et en comprimant jusqu'à une centaine d'atmosphère.

Pour d'autres gaz réputés permanents : l'oxygène, l'hydrogène, l'azote, le point critique est au-dessous de — 100°. Si l'on veut, par la détente brusque, refroidir l'un de ces gaz bien au-dessous de cette température, il faut détendre à partir d'une pression initiale de 600 atmosphères, et d'une température initiale inférieure à zéro ; on entoure alors le manchon de chlorure de méthyle (295), qui a l'avantage d'être transparent. — La cloche de verre C sert à dessécher l'air autour du manchon, et à éviter ainsi le dépôt de givre qui empêcherait de voir ce qui se passe dans le tube T.

316. Liquéfaction de l'oxygène, de l'azote et de l'hydrogène, à l'état statique. — Enfin, en employant, avec la compression, des procédés de refroidissement plus énergiques, on a obtenu, en masses liquides d'un volume notable, la plupart des gaz qu'on n'avait vus d'abord qu'à l'état de brouillard au moment de la détente.

Pour liquéfier l'*oxygène*, MM. Wroblewski et Olzewski ont eu recours à l'évaporation *dans le vide* de l'éthylène (C^4H^4) liquéfié, qui abaisse la température jusqu'à — 140° environ. Il est encore plus commode, comme le fait M. Cailletet, d'employer le formène (C^2H^4) qui, en s'évaporant *dans l'air*, donne une température évaluée à — 160°. L'oxygène se présente alors sous l'aspect d'un liquide transparent, moins dense que l'eau ; il bout dans l'air à — 186° ; son point critique est — 113°.

Pour liquéfier l'*azote*, on comprime ce gaz au sein d'un bain d'oxygène liquide en ébullition dans l'air, c'est-à-dire à une température de — 186°. On obtient un liquide incolore qui, par l'évaporation rapide dans le vide, peut abaisser la température à — 213°.

C'est au moyen d'un bain d'azote liquide, à — 213°, que l'on arrive à liquéfier l'*hydrogène*. La compression seule ne suffit pas, mais en la faisant suivre d'une détente brusque, on obtient l'hydrogène sous la forme d'un liquide *transparent et incolore*. — Ce résultat est particulièrement remarquable pour l'hydrogène, que ses propriétés chimiques rapprochent des métaux, et qu'on aurait pu s'attendre à voir apparaître sous un aspect semblable à celui du mercure.

CHAPITRE VIII

HYGROMÉTRIE

317. État hygrométrique, ou fraction de saturation. — La présence de la vapeur d'eau dans l'atmosphère est démontrée, soit par la condensation de cette vapeur à la surface des corps froids, sous la forme de rosée, soit par l'augmentation de poids qu'éprouvent dans l'air certaines substances, dites *substances déliquescentes*, telles que le chlorure de calcium ou le carbonate de potasse.

Lorsque la vapeur d'eau atmosphérique est voisine de son point de saturation, il suffit d'un faible abaissement de température pour en déterminer la condensation partielle : on dit alors que l'air est *humide*. — Quand la vapeur atmosphérique est éloignée de son point de saturation, la condensation ne se produit que si la température est abaissée de plusieurs degrés : on dit alors que l'air est *sec*.

Pour mieux fixer les idées à cet égard, supposons que, à un moment donné, la tension de la vapeur d'eau dans l'air soit $12^{mm},5$, la température étant 15°. Le tableau ci-après montre que la tension maximum à 15° est $12^{mm},7$; à 14°, elle serait $11^{mm},9$; si donc la température venait à s'abaisser d'un degré seulement, c'est-à-dire de 15° à 14°, une portion de cette vapeur devrait se liquéfier : dans ces conditions, l'air est donc *très humide*. — Si, un autre jour, la tension de la vapeur dans l'atmosphère était encore $12^{mm},5$, mais que la température fût de 20°, la vapeur serait très éloignée de son point de saturation, puisque la température pourrait s'abaisser de 5 degrés sans qu'il y eût condensation : l'air serait donc *très sec*.

Le degré d'humidité de l'air dépend donc, non pas de la valeur absolue de la tension actuelle de la vapeur d'eau, mais du *rapport qui existe entre la tension actuelle* f *et la tension maximum* F *à la même température*. Ce rapport $\frac{f}{F}$ est ce qu'on nomme *état hygrométrique* de l'air, ou *fraction de saturation*, au moment considéré. — Il résulte de cette définition que, dans l'air absolument sec, l'état hygrométrique serait zéro; dans l'air saturé de vapeur d'eau, il serait égal à l'unité.

Remarque. — Soient f la force élastique actuelle de la vapeur d'eau dans l'air, et p le poids de vapeur contenu dans un volume déterminé de cet air; soient F la tension maximum à la même température, et P le poids de vapeur que contiendrait le même volume, s'il était saturé : si l'on admet que la loi de Mariotte soit applicable, on aura $\frac{f}{F} = \frac{p}{P}$, et l'on pourra encore définir l'*état hygrométrique* comme étant le rapport entre le poids p de la vapeur actuellement contenue dans un volume déterminé d'air et le poids P que ce même volume contiendrait, s'il était saturé à la même température.

TENSION MAXIMUM DE LA VAPEUR D'EAU, DE DEGRÉ EN DEGRÉ. ENTRE — 10° ET + 35°.

Température.	Force élastique en millimètres.	Température.	Force élastique en millimètres.	Température	Force élastique en millimètres.
— 10°	2,09	+ 6.	7,00	+ 22°	19,66
9.	2,27	7.	7,49	23.	20,89
8.	5,46	8.	8,02	24.	22,18
7.	2,67	9.	8,57	25.	23,55
6.	2,89	10.	9,16	26.	24,99
5.	3,15	11.	9,79	27.	26,50
4.	3,39	12.	10,46	28.	28,10
3.	3,66	13.	11,16	29.	29,78
2.	3,95	14.	11,91	30.	31,55
1.	4,27	15.	12,70	31.	33,40
0.	4,60	16.	15,53	32.	35,36
+ 1.	4,94	17.	14,42	33.	37,41
2.	5,30	18.	15,36	34.	39,56
3.	5,69	19.	16,33	35.	41,83
4.	6,10	20.	17,39		
5.	6,53	21.	18,49		

On donne le nom d'*hygromètres* aux instruments qui servent à la détermination expérimentale de l'état hygrométrique.

318. Hygromètre chimique. — L'hygromètre chimique consiste en une série de tubes, en forme d'U (*fig.* 219), contenant des fragments de pierre ponce imprégnés d'acide sulfurique, qui serviront à absorber la vapeur d'eau contenue dans un certain volume d'air extérieur : l'appel de cet air dans les tubes est déterminé par l'écoulement de l'eau de l'aspirateur V. Le tube A est destiné à empêcher la vapeur émise par l'eau de l'aspirateur de pénétrer dans les autres tubes : c'est uniquement dans la série comprise de F à B que doit se faire l'absorption de la vapeur abandonnée par l'air, ce qu'on peut toujours obtenir en rendant l'écoulement suffisamment lent. A la fin de l'expérience, on jauge le volume U de l'eau écoulée, on note la température t_1 du thermomètre placé dans l'aspirateur, et la pression extérieure H. Enfin, on détache la série des tubes de B à F, et on en détermine leur accroissement de poids p : c'est le poids de la vapeur d'eau absorbée.

Voici comment on peut raisonner, pour déduire, des données de l'expérience, la valeur de la force élastique f de la vapeur d'eau dans l'atmosphère. — Soit t la température extérieure, et soit V le volume qui

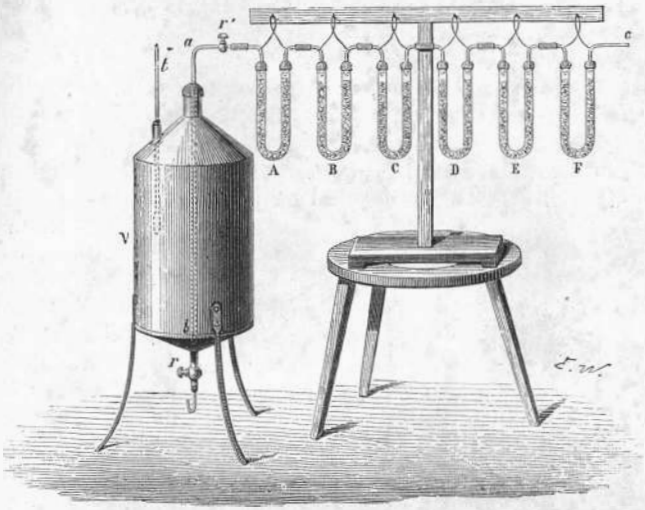


Fig. 219. — Hygromètre chimique.

était occupé, *à l'extérieur*, par la vapeur qui a été condensée : on a la relation (286) :

$$(1) \qquad p = V \times 0{,}001\,293 \times 0{,}622 \times \frac{f}{76} \times \frac{1}{1+\alpha t}.$$

D'autre part, V exprime également le volume occupé, à l'extérieur, par l'*air* qui a traversé l'appareil, et dont la tension propre était $H - f$ et la température t; lorsque cet air est arrivé dans l'aspirateur, il y a acquis un volume U, une température t_1, et une tension propre $H - F_1$ (F_1 étant la tension maximum de la vapeur d'eau pour la température t_1) ; on a donc, en appliquant la loi de Gay-Lussac à cette masse d'air,

$$\frac{V(H-f)}{1+\alpha t} = \frac{U(H-F_1)}{1+\alpha t_1}.$$

En tirant de cette équation la valeur de $\frac{V}{1+\alpha t}$ et la reportant dans la formule (1), il vient :

$$p = U\frac{H-F_1}{H-f} \times 0{,}001\,293 \times 0{,}622 \times \frac{f}{76} \times \frac{1}{1+\alpha t_1},$$

équation dont on pourra tirer f. — Le quotient $\frac{f}{F}$ sera l'état hygrométrique cherché (F étant la tension maximum à t^0).

Avec un aspirateur d'une quarantaine de litres, et un écoulement d'une lenteur suffisante, l'expérience dure toujours plusieurs heures; aussi la valeur trouvée ne représente-t-elle que l'état hygrométrique *moyen* de l'atmosphère, pendant la durée de l'expérience.

319. Hygromètre à cheveu, ou hygromètre de H.-B. de Saussure. — Dans l'hygromètre de H.-B. de Saussure (*fig.* 220), c'est un cheveu AB qui indique, par ses variations de longueur, les changements qui surviennent dans l'humidité de l'air (*). Pour amplifier ces variations, le cheveu est fixé en A, au moyen d'une pince, à la partie supérieure d'un cadre de laiton; en B, il s'attache sur l'une des gorges d'une double poulie, qui porte une aiguille légère C mobile sur un cadran divisé MM'. Sur l'autre gorge de la poulie, s'enroule un fil de soie tendu par un petit poids s (**).

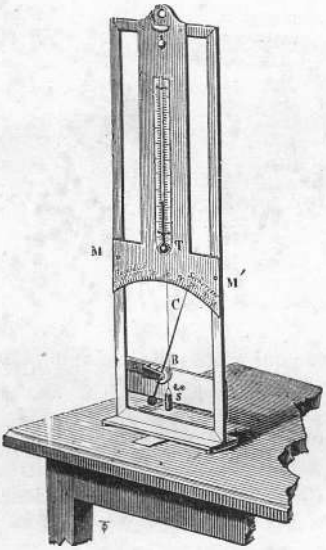


Fig. 220. — Hygromètre à cheveu.

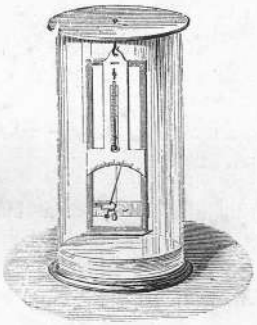


Fig. 221.

Pour graduer l'hygromètre à cheveu, on détermine deux points fixes : 1° le centième degré, ou point d'*humidité extrême* : c'est le point où s'arrête l'aiguille quand l'appareil a séjourné quelque temps dans un vase contenant une petite couche d'eau (*fig.* 221), et dont les parois

(*) Le cheveu a été préalablement débarrassé de toute matière grasse par une immersion d'une demi-heure environ dans de l'eau bouillante, renfermant un centième de carbonate de soude; il a été ensuite lavé et séché.

(**) Tout le monde connaît ces petits instruments, grossièrement construits, qui servent à prévoir, avec plus ou moins de probabilité, la pluie ou le beau temps, et qui représentent tantôt un moine dont le capuchon vient abriter la tête quand le temps

ont été mouillées; 2° le zéro, ou point de *sécheresse extrême :* c'est le point où s'arrête l'aiguille dans un vase contenant une couche d'acide sulfurique concentré, qui absorbe l'humidité de l'air. — L'intervalle compris entre les deux points fixes est ensuite divisé en 100 parties égales; ce sont les *degrés de l'hygromètre.*

320. Détermination de l'état hygrométrique au moyen de l'hygromètre à cheveu. — Tables de Gay-Lussac. — La graduation obtenue comme il vient d'être dit ne donne pas immédiatement l'*état hygrométrique :* l'expérience a montré que l'on se tromperait beaucoup, si l'on croyait, par exemple, que l'instrument dût marquer 50 degrés quand l'état hygrométrique est $\frac{1}{2}$, ou 25 degrés quand l'état hygrométrique est $\frac{1}{4}$. Il est donc nécessaire de dresser une table donnant les valeurs des fractions de saturation qui correspondront à chacun des degrés. — Voici, par exemple, une table construite par Gay-Lussac, pour l'un de ces instruments (*).

DEGRÉS DE L'HYGROMÈTRE.	FRACTIONS DE SATURATION.	DEGRÉS DE L'HYGROMÈTRE.	FRACTIONS DE SATURATION
0.	0,000	60.	0,363
10.	0,046	70.	0,472
20.	0,094	80.	0,612
30.	0,148	90.	0,791
40.	0,208	100.	1,000
50.	0,278		

Pour construire cette table, Gay-Lussac a donné une méthode fondée sur ce principe, que *les vapeurs émises par les solutions aqueuses ont une force élastique d'autant moindre, toutes choses égales d'ailleurs, que ces solutions sont plus concentrées.* — Gay-Lussac préparait un certain nombre de solutions d'acide sulfurique dans l'eau, et les introduisait tour à tour dans l'éprouvette représentée par la figure 221. A chaque expérience, l'aiguille marquait un certain degré : pour avoir la fraction de saturation correspondante, il restait à déterminer la tension f de la vapeur dans l'atmosphère de l'éprouvette, et à la diviser par la tension maximum F de la vapeur qui serait émise par l'eau pure à la même température; or F est donnné par la table précédente (p. 244); quant à f, on l'obtenait en faisant passer au sommet d'un tube barométrique une petite quantité de la solution, et mesurant la dépression de la colonne mercurielle.

Après un certain nombre d'expériences semblables, pour représenter les résultats obtenus, on marqua sur une droite OA (*fig.* 222) des divisions égales, représentant les degrés de l'instrument : aux points m, m', m'', ..., qui correspondaient aux degrés auxquels l'aiguille s'était arrêtée dans chaque

est à la pluie, tantôt un petit personnage qui rentre sous un abri, etc. — Dans tous ces instruments, les mouvements de la pièce mobile sont produits par une corde de boyau, qui se détord plus ou moins, suivant que l'air est plus ou moins humide.

(*) Il résulte des recherches de Regnault que deux hygromètres à cheveu sont rarement comparables entre eux; de là, la nécessité de construire une table de graduation particulière à *chaque instrument.*

expérience, on éleva des perpendiculaires mp, $m'p'$, $m''p''$, ... proportionnelles aux fractions de saturation correspondantes; enfin, on joignit par un trait continu les extrémités de ces perpendiculaires. Il est clair que, si

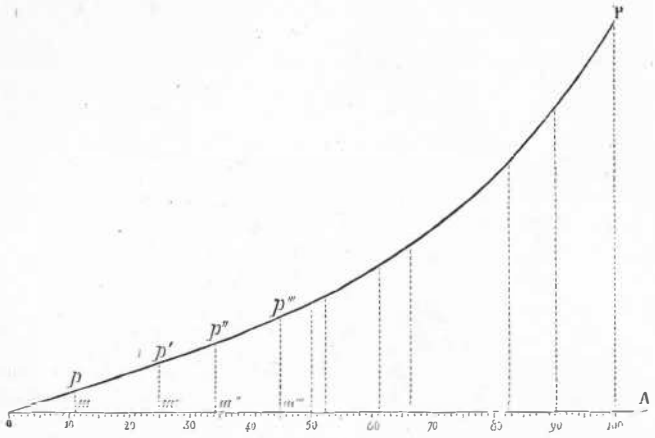


Fig. 222.

l'échelle adoptée est suffisamment grande, cette méthode donne, avec toute l'approximation désirable, la fraction de saturation pour un degré quelconque de l'instrument.

321. Hygromètres de condensation. — Hygromètre de Daniell. — L'hygromètre de Daniell se compose d'un tube de verre recourbé (*fig.* 223), dont les deux branches sont terminées chacune par une boule. La boule A, en verre noir, contient de l'éther, dans lequel plonge le réservoir d'un thermomètre *t*. La boule B est entourée d'une gaze. Avant de fermer l'appareil, on en a chassé l'air par l'ébullition de l'éther.

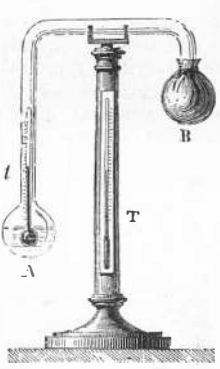


Fig. 223.
Hygromètre de Daniell.

Pour trouver l'état hygrométrique à un moment donné, on détermine d'abord la température extérieure T, au moyen du thermomètre qui est fixé sur le pied de l'instrument. — On verse ensuite de l'éther, goutte à goutte, sur la gaze qui couvre la boule B, de manière à la refroidir par évaporation : dès qu'il s'est établi ainsi une différence de température entre les deux boules, l'éther contenu dans la boule A commence à se vaporiser, la vapeur allant se condenser dans la boule B. Cette vaporisation abaisse progressivement la température de la boule A,

en sorte qu'il arrive un moment où l'on voit la surface extérieure de cette boule se couvrir d'un dépôt de rosée, dû à la condensation de la vapeur d'eau contenue dans l'air environnant. A ce moment, on note la température t du thermomètre intérieur : c'est le *point de rosée*, c'est-à-dire la température à laquelle la vapeur d'eau contenue dans l'atmospbère est devenue saturante. Donc, si l'on cherche, dans les tables de tension maximum de la vapeur d'eau, la valeur qui correspond à cette température t, on aura la tension actuelle f de la vapeur d'eau dans l'atmosphère (*). — On cherchera, dans les mêmes tables, la tension maximum F qui correspond à la température extérieure T. — Enfin, en divisant f par F, on aura l'état hygrométrique cherché.

Les indications de l'hygromètre de Daniell manquent de précision. Le refroidissement se propageant, dans la boule A, de l'intérieur à l'extérieur, et l'éther n'étant pas agité, la température observée t n'est jamais exactement celle de la couche d'air qui environne la boule, à l'instant du dépôt de rosée. — Il faut encore signaler, comme cause d'erreur, la vapeur d'eau introduite dans l'atmosphère par la respiration de l'observateur.

322. Hygromètres de Regnault, d'Alluard. — Ces causes d'erreur sont évitées dans l'hygromètre de Regnault (*fig.* 224). L'éther est contenu dans un dé d'argent mince et brillant B, fixé à l'extrémité d'un cylindre de verre A ; un thermomètre T plonge dans le liquide, ainsi qu'un tube C qui s'ouvre à l'extérieur. La partie supérieure du cylindre A communique, par un tube de caoutchouc MM′ de plusieurs mètres, avec un aspirateur semblable à celui de la figure 219. Quand on ouvre l'aspirateur, on produit un appel d'air qui pénètre en C, traverse l'éther et en active la vaporisation. — Pour saisir avec exactitude le point de rosée, on dispose, à côté du dé d'argent B, un autre dé B′, en tout semblable, mais ne contenant pas d'éther : il permet d'apprécier, par contraste, l'état de la surface B. L'expérimentateur observe l'appareil de loin, au moyen d'une lunette, qui permet d'apercevoir à la fois les deux dés B et B′, ainsi que les divisions grossies des deux thermomètres T et T′ : l'un de ces thermomètres donne la température du point de rosée ; l'autre, la température de l'atmosphère. En réglant l'écoulement de l'eau, on parvient à faire apparaître et disparaître alternativement la rosée, à

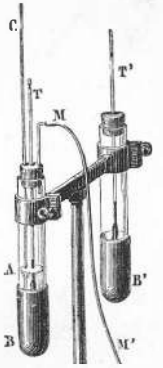


Fig. 224. — Hygromètre de Regnault.

(*) La table de la page 244 est extraite d'une table construite par Regnault, qui donne les valeurs de la tension maximum de la vapeur d'eau, de dixième de degré en dixième degré.

des températures de plus en plus rapprochées l'une de l'autre, de manière à atteindre une grande précision. — Le dé métallique conduisant bien la chaleur, et l'éther étant agité, la température observée T ne diffère pas sensiblement de celle de la surface de l'argent; d'autre part, l'observateur, éloigné de l'appareil, ne modifie pas, par sa respiration, la tension de la vapeur d'eau dans le voisinage de l'hygromètre.

L'hygromètre de M. Alluard est un perfectionnement de celui de Regnault. L'éther est placé dans une caisse parallélipipédique de laiton D, à paroi mince, et dorée sur l'une de ses faces verticales. C'est sur cette face que l'observateur observe de loin, avec une lunette, le dépôt de rosée, en comparant l'aspect de la surface D avec celle d'une lame métallique dorée CC qui l'encadre sans la toucher, et qui, n'étant en contact qu'avec l'atmosphère, conserve son éclat (*).

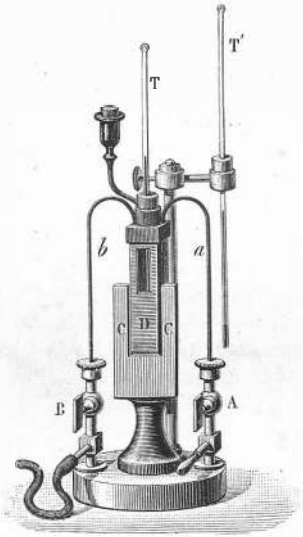


Fig. 225. — Hygromètre d'Alluard.

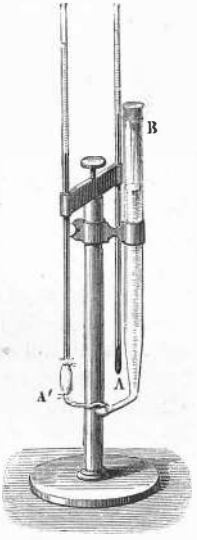


Fig. 226. — Psychromètre.

323. Psychromètre. — Le psychromètre se compose de deux thermomètres très sensibles A et A' (*fig.* 226), fixés sur un même pied. Le réservoir du thermomètre A' est couvert d'une toile fine, maintenue constamment

(*) Quand on opère en plein air, et que la vitesse du vent est un peu grande, la vitesse d'évaporation est telle que le dépôt de rosée n'apparaît plus. — M. Crova a construit un hygromètre de condensation, fondé toujours sur les mêmes principes, mais dans lequel la surface sur laquelle doit se former le dépôt de rosée est placée dans une enveloppe fermée, où l'on fait passer lentement l'air dont on veut mesurer l'état hygrométrique.

humide à l'aide d'une mèche de coton qui aspire, par capillarité, l'eau contenue dans le tube B. Le liquide se vaporise à la surface du réservoir A′, et lui prend la chaleur nécessaire à son changement d'état ; le thermomètre A′ marque donc une température t' inférieure à la température t de l'atmosphère, qui est donnée par le thermomètre A. L'expérience montre que la différence $t - t'$ est d'autant plus grande que l'évaporation est plus rapide, c'est-à-dire que l'air est plus éloigné de son point de saturation.

On emploie, pour calculer la tension x de la vapeur d'eau dans l'atmosphère, à un moment déterminé, la formule empirique

$$x = F' - A\,(t - t')\,H,$$

dans laquelle F′ est la tension maximum pour la température t', H est la hauteur barométrique ; enfin A est un coefficient numérique, qui varie avec le mode d'exposition de l'instrument : on détermine la valeur de ce coefficient, pour chaque installation, par une expérience préliminaire (*).

Pour démontrer cette formule du psychromètre, remarquons que, l'équilibre existant, le thermomètre A′ reçoit par minute autant de chaleur qu'il en perd dans le même temps. Or, la quantité de chaleur cédée par A′ est proportionnelle au poids d'eau qui s'évapore en une minute : elle est donc proportionnelle à la surface S du liquide et à l'excès $F' - x$ (288) ; nous admettrons avec Dalton que, pour de faibles variations de la hauteur barométrique, la vitesse d'évaporation est inversement proportionnelle à cette hauteur H. En résumé, la quantité de chaleur cédée par le thermomètre A′, au poids d'eau qui s'évapore par minute, pourra être représentée par $BS\frac{F' - x}{H}$, en désignant par B un coefficient constant.

D'autre part, l'air ambiant étant à une température t plus élevée que celle du thermomètre, les corps environnants constituent une enceinte qui rayonne plus de chaleur sur le thermomètre que celui-ci n'en rayonne autour de lui. La quantité de chaleur absorbée par minute est donc proportionnelle à la surface S, et à l'excès de température $t - t'$; ce sera $CS\,(t - t')$, en désignant encore par C un coefficient constant.

En écrivant que la chaleur gagnée est égale à la chaleur perdue par minute, et désignant par A le quotient $\frac{C}{B}$, on aura :

$$\frac{F' - x}{H} = A\,(t - t'), \quad \text{d'où} \quad x = F' - AH\,(t - t').$$

Le coefficient C dépend du rayonnement, c'est-à-dire du mode d'exposition de l'instrument ; par suite, il en est de même de A. — Par contre, ce coefficient A est indépendant de la surface. Deux psychromètres, de dimensions différentes, installés dans le même lieu, donneront, au même instant, les mêmes indications.

(*) Pour effectuer cette détermination, on installe l'instrument à la place qu'il doit occuper ; on observe les températures t et t' des deux thermomètres, ainsi que la pression H, et l'on cherche F′ dans les tables ; on détermine la tension x au moyen de l'hygromètre de Regnault. On connaît alors toutes les quantités qui entrent dans la formule, sauf A : il est donc facile d'en tirer la valeur de ce coefficient. — Il varie avec le mode d'exposition, de 0,00074 à 0,00128 environ.

CHAPITRE IX

CALORIMÉTRIE

324. Objet de la calorimétrie. — La *calorimétrie* est la mesure des *quantités de chaleur* dont l'absorption ou le dégagement correspondent à des effets déterminés.

Le présent chapitre comprendra trois parties : 1° l'étude des *chaleurs spécifiques*, ou quantités de chaleur nécessaires pour produire, sur les divers corps, des variations de température déterminées; 2° l'étude des *chaleurs latentes*, ou quantités de chaleur nécessaires pour produire les changements d'état, sans variation de température; 3° l'étude des *chaleurs de combinaison*, ou quantités de chaleur dégagées ou absorbées dans la formation ou la destruction des composés chimiques.

On verra plus loin (chap. XI) qu'il ne faut voir, dans ces divers phénomènes, que des transformations de l'énergie, mais l'étude des quantités de chaleur mises en jeu doit d'abord être effectuée indépendamment de toute conception théorique.

325. Unité de chaleur : calorie. — Dans l'évaluation des quantités de chaleur qui correspondent aux divers phénomènes, on prend pour *unité de chaleur*, ou *calorie*, *la quantité de chaleur nécessaire pour élever la température d'un gramme d'eau de* 0° *à* 1°.

Nous ferons cependant, dès maintenant, une remarque importante. — L'expérience montre que, lorsqu'on mélange un gramme d'eau à 0° avec un gramme d'eau à 2°, le mélange prend la température de 1°, ce qui prouve que le second gramme, en se refroidissant de 2° à 1°, a abandonné une calorie; ou, inversement, que pour échauffer un gramme d'eau de 1° à 2°, il faut lui fournir une calorie. — De même, lorsqu'on mélange un gramme d'eau à 0° avec un gramme d'eau à 4°, le mélange prend la température de 2°, ce qui prouve, en raisonnant de la même manière, que, pour échauffer un gramme d'eau de 2° à 4°, il faut 2 calories. — En étendant de proche en proche ces résultats d'expérience, on trouve que la quantité de chaleur nécessaire pour élever d'un degré la température d'un gramme d'eau est toujours sensiblement la même, *quelle que soit la température initiale*, pourvu que cette température soit comprise entre 0° et 100°.

On peut donc dire encore que *la calorie est la quantité de chaleur nécessaire pour élever de t degrés à $t + 1$ degrés la température de 1 gramme d'eau*, et cela avec d'autant plus d'exactitude que la température t est plus voisine de 0°.

L'unité de chaleur ainsi définie est la *petite calorie*. — On emploie souvent, comme unité pratique, la *grande calorie* qui vaut 1 000 petites calories : c'est donc la quantité de chaleur nécessaire pour élever de t degrés à $t + 1$ degrés, la température de 1 kilogramme d'eau.

I. — MESURE DES CHALEURS SPÉCIFIQUES.

326 Définition des chaleurs spécifiques. — Des poids égaux de *corps différents* exigent, en général, pour s'échauffer d'un même nombre de degrés, des quantités différentes de chaleur.

Si, par exemple, on plonge 1 kilogramme de cuivre à 100°, dans 1 kilogramme d'eau à 0°, on trouve que le mélange prend une température de 9° environ. Le kilogramme de cuivre a donc éprouvé un abaissement de température de 91 degrés. D'autre part, la *quantité de chaleur* qu'il a abandonnée n'a élevé la température du kilogramme d'eau que de 9 degrés : elle est représentée par 9 grandes calories. — On peut donc dire, en raisonnant sur des poids mille fois plus petits, que 9 petites calories suffisent pour élever de 91 degrés la température d'un gramme de cuivre; en d'autres termes, un gramme de cuivre exige environ dix fois moins de chaleur qu'un gramme d'eau, pour éprouver une même variation de température.

On appelle *chaleur spécifique d'un corps*, la *quantité de chaleur nécessaire pour élever de 1 degré la température de 1 gramme de ce corps.*

Si l'on rapproche cette définition de celle de l'unité de chaleur (525), on voit que la chaleur spécifique *de l'eau* est égale *à l'unité.*

327. Expression de la quantité de chaleur qui correspond à une variation déterminée de température, pour un corps déterminé. — Proposons-nous, par exemple, de calculer la quantité de chaleur qu'il faut fournir à un morceau de cuivre pesant 5 grammes, pour l'échauffer de 0° à 100°; en supposant connue la chaleur spécifique du cuivre 0,095. — D'après la définition même de la chaleur spécifique, 1 gramme de cuivre, pour s'échauffer d'un degré, exige $0^{cal},095$; 5 grammes, pour s'échauffer d'un degré, prendront $0^{cal},095 \times 5$; pour s'échauffer de 100 degrés, ils exigeront $0^{cal},095 \times 5 \times 100$, ou $47^{cal},5$.

En général, soit p le poids d'un corps, c sa chaleur spécifique : la quantité q de chaleur qu'il absorbe en s'élevant de t à t', ou qu'il abandonne en s'abaissant de t' à t, est :

$$q = pc(t' - t).$$

328. Capacité calorifique d'un corps. — Dans l'expression précédente, si l'on considère le cas particulier où la variation de température $(t' - t)$ est de 1 degré, la quantité de chaleur correspondante est exprimée numériquement par le produit pc. Ce produit est ce qu'on nomme la *capacité calorifique* du corps considéré : c'est le nombre de calories nécessaire pour faire éprouver, *au corps tout entier*, une variation de température de 1 degré.

Si l'on désigne par C la capacité calorifique d'un corps, et par v une variation de température déterminée, on voit que la quantité de chaleur correspondante sera représentée par l'expression

$$q = Cv.$$

329. Détermination expérimentale des chaleurs spécifiques des corps solides. — Méthode de la fusion de la glace. — Pour déterminer les chaleurs spécifiques des corps solides, on peut employer une méthode d'une grande simplicité, au moins quant à son principe.

Un poids connu P du corps étant chauffé à une température connue T, on le met en présence d'une masse de glace à 0°, et l'on mesure le poids π de glace dont il détermine la fusion, en s'abaissant lui-même jusqu'à la température zéro. — Or, si l'on désigne par x la chaleur spécifique inconnue, le corps, en se refroidissant de T degrés, aura perdu $Px\mathrm{T}$; d'autre part, nous verrons plus loin que 1 gramme de glace absorbe, pour fondre sans changer de température, 80 calories : le poids π aura donc absorbé un nombre de calories représenté par $\pi \times 80$. La quantité de chaleur abandonnée par le corps étant égale à celle qui a été absorbée par la glace, on a l'équation

$$Px\mathrm{T} = \pi \times 80;$$

d'où l'on tire la valeur de x.

330. Emploi du puits de glace. — Pour appliquer cette méthode, le procédé indiqué par Black consiste à employer un *puits de glace*, c'est-à-dire une cavité pratiquée dans un bloc de glace compacte, que l'on ferme avec un autre morceau de glace (*fig.* 227). Après avoir essuyé les parois de la cavité, on y introduit le corps chaud, et l'on replace le couvercle; au bout d'un temps suffisant, on recueille l'eau de fusion, avec du papier buvard : l'accroissement de poids du papier représente le poids π de cette eau.

Fig. 227.
Puits de glace.

Mais cette valeur de π ne peut jamais être considérée comme rigoureusement exacte, car on peut toujours craindre, ou que le papier ne recueille qu'incomplètement l'eau de fusion, ou que le frottement ne provoque la fusion d'une nouvelle quantité d'eau. — Enfin, plus le bloc

est compact, plus il est à craindre que sa température intérieure ne soit sensiblement inférieure à 0°, ce qui constitue une nouvelle cause d'erreur (*).

331. Calorimètre de Bunsen. — Dans le calorimètre de Bunsen, on évalue la quantité de chaleur cédée à l'appareil, par la mesure de la *contraction* qui accompagne la fusion d'une certaine masse de glace, masse qui est proportionnelle à cette contraction elle-même.

Dans le tube à deux branches BC (*fig.* 252), on a introduit de l'eau distillée et du mercure; puis, en retournant l'appareil, on a porté l'eau à l'ébullition,

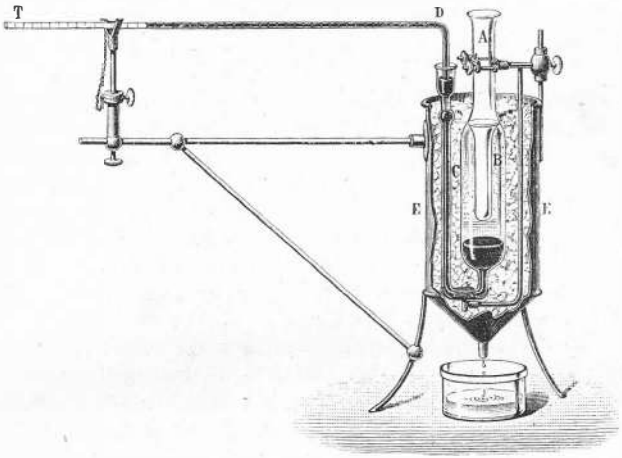


Fig. 228. — Calorimètre de Bunsen.

pour chasser l'air qui était en dissolution. L'appareil étant alors redressé dans la position de la figure, le tube B contient de l'eau dans sa partie supérieure, et du mercure dans sa partie inférieure. — Lorsqu'on veut effectuer une série de mesures calorimétriques, il faut, avant tout, solidifier en partie la masse d'eau contenue dans l'appareil. Pour cela, on fait circuler, dans le moufle A, de l'alcool préalablement refroidi à — 20°; la température de l'eau s'abaissant au-dessous de 0°, l'eau reste d'abord liquide, en surfusion; puis, à un instant donné, une portion de l'eau se solidifie, et la température du mélange d'eau et de glace remonte *exactement* à 0°. L'appareil est alors placé dans la caisse cylindrique E; on l'entoure de neige, et, s'il y a lieu, on achève de remplir le tube latéral C avec du mercure. On adapte, à ce tube C, l'extrémité D du tube T; une colonne de mercure pénètre jusqu'en un certain point du tube horizontal T, qui est divisé en parties d'égales capacités.

(*) Lavoisier et Laplace faisaient usage d'un appareil composé de trois enceintes métalliques. L'enceinte intérieure, recevait le corps chauffé. L'enceinte intermédiaire contenait la glace dont le corps devait déterminer la fusion : on recueillait l'eau de fusion par un robinet. Enfin, l'enceinte extérieure contenait de la glace, destinée uniquement à préserver l'enceinte intermédiaire de la chaleur qui aurait pu lui être cédée par le milieu ambiant. — Cet appareil est aujourd'hui abandonné.

On procède d'abord à la mesure de la quantité dont rétrograde le mercure, pour *une calorie* cédée à l'appareil. A cet effet, on verse dans le moufle intérieur A une masse d'eau égale à π^{gr}, dont la température t est connue; une portion de la glace fond, et le mercure se déplace de n divisions, pour les πt calories cédées; pour une seule calorie, il se déplacerait de $\frac{n}{\pi t} = k$ divisions. Ce nombre k est *la constante du calorimètre.*

Soit maintenant un corps quelconque, de masse P^{gr}, à la température T. On l'introduit dans le moufle; si le mercure rétrograde de N divisions, on en conclut que le nombre de calories cédées par le corps est $\frac{N}{k}$, et l'on a :

$$Px\,T = \frac{N}{k};$$

d'où l'on tire la valeur de x.

332. Méthode des mélanges — L'une des méthodes les plus exactes, pour mesurer les chaleurs spécifiques, est la *méthode des mélanges*, qui est due au physicien écossais Black : en voici le principe.

On chauffe, à une température déterminée T, un poids connu P du corps soumis à l'expérience; puis, on plonge ce corps dans une masse d'eau M dont on connaît la température t. Quand l'équilibre de température est établi, on note la température θ du mélange. On exprime alors que *la quantité de chaleur perdue par le corps est égale à la quantité de chaleur gagnée par l'eau.*

Soit x la chaleur spécifique inconnue; le corps s'étant refroidi d'un nombre de degrés $(T - \theta)$, la quantité de chaleur qu'il a perdue est exprimée (327) par $Px\,(T - \theta)$; l'eau s'étant échauffée d'un nombre de degrés $(\theta - t)$, la quantité de chaleur qu'elle a gagnée est $M\,(\theta - t)$. En égalant ces deux quantités de chaleur, on a

$$(1) \qquad Px\,(T - \theta) = M\,(\theta - t);$$

d'où l'on tire la valeur de x.

Mais, pour que le résultat soit exact, il est nécessaire d'effectuer plusieurs corrections, que nous allons maintenant indiquer.

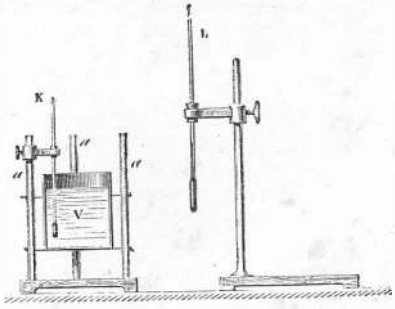


Fig. 229.

333. *Corrections à faire subir aux résultats précédents.* — Le raisonnement qui précède suppose que toute la chaleur abandonnée par le corps a été absorbée par l'eau. En réalité, l'eau est contenue dans un vase de laiton, ou *calorimètre* (*fig.* 229), qui a pris une portion de cette chaleur. — Désignons par p le poids du calorimètre et par c la chaleur spécifique

du laiton, supposée connue; la quantité de chaleur que le calorimètre a gagnée est $pc\ (\theta - t)$, quantité qui doit être ajoutée au second membre de l'équation (1).

D'autre part, si le corps soumis à l'expérience est en petits fragments, on le place dans une enveloppe à parois minces. Soit p_1 le poids de cette enveloppe et c_1 sa chaleur spécifique, supposée connue; la quantité de chaleur que l'enveloppe abandonne à l'eau est $p_1c_1\ (T - \theta)$, quantité qui doit être ajoutée au premier membre de l'équation (1).

On obtient ainsi, pour déterminer x, l'équation plus exacte :

$$(2) \qquad (Px + p_1c_1)(T - \theta) = (M + pc)(\theta - t)\ (*).$$

334. Appareil de Regnault. — La disposition adoptée par Regnault, pour l'application de la méthode des mélanges, a l'avantage de donner

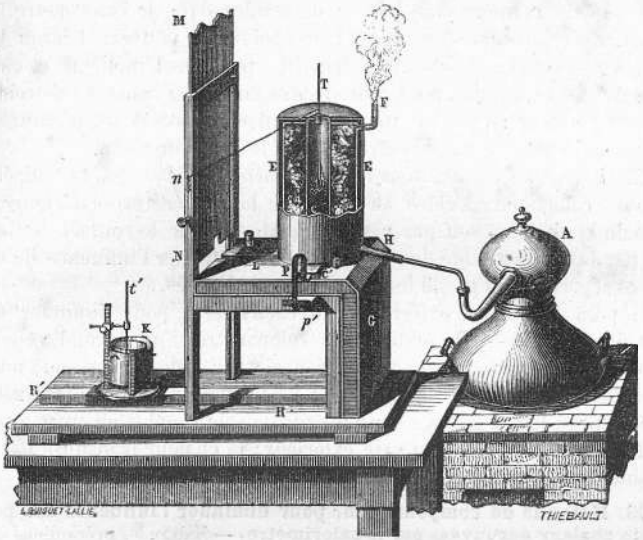


Fig. 250. — Appareil de Regnault.

la température initiale avec une grande exactitude, et d'atténuer les causes d'erreur des différentes phases de l'expérience.

Le corps est placé dans une corbeille de fil de laiton très mince C (*fig.* 250); dans l'axe de cette corbeille, vient se loger le réservoir d'un thermomètre T. Pour chauffer le corps, on suspend la corbeille, par un fil de soie, dans une étuve à vapeur d'eau EE. L'étuve repose sur une

(*) Dans les recherches précises, on tient compte aussi de la chaleur absorbée par le thermomètre, qui reste plongé dans l'eau pendant l'expérience. Il suffit, pour cela, de connaître la chaleur spécifique du mercure et celle du verre.

sorte de caisse métallique coudée LHG, qui contient de l'eau à la température du laboratoire; la portion horizontale de cette caisse est traversée par une ouverture qui correspond à la chambre centrale de l'étuve, et qu'on tient fermée, pendant l'échauffement du corps, au moyen d'un registre P. — Le calorimètre K est placé sur un support qui pourra glisser le long d'une coulisse de bois RR′, de manière à venir se placer au-dessous de l'étuve.

Pour faire une expérience, on tient d'abord l'écran MN baissé, pour préserver le calorimètre du rayonnement. Lorsque le thermomètre T indique une température stationnaire, on lève l'écran, on retire le registre P et l'on fait glisser le calorimètre sous l'étuve (dans cette position, il est garanti du rayonnement de l'étuve et de la chaudière à vapeur, par la caisse LHG); enfin, on détache en *n* le fil qui soutient la corbeille, de manière à la laisser descendre dans le calorimètre, on ramène le calorimètre vers R′ et l'on abaisse de nouveau l'écran MN. Le thermomètre *t* monte d'abord très vite, puis plus lentement, et enfin il atteint un maximum, pour redescendre ensuite, à cause du refroidissement de l'eau : c'est ce maximum qui constitue la température θ. relative à l'état d'équilibre entre l'eau et le corps immergé.

335. *Détails de construction du calorimètre.* — Dès que la température du calorimètre s'élève au-dessus de la température extérieure, il perd de la chaleur, soit par rayonnement, soit par le contact de l'air, soit par la conductibilité des supports. Pour atténuer l'influence de ces causes d'erreur, on prend les précautions suivantes.

On polit la surface extérieure du calorimètre, pour diminuer son pouvoir émissif. — On entoure le calorimètre d'un second vase de laiton, poli intérieurement, qui lui renvoie par réflexion presque toute la chaleur émise, et qui le préserve de l'agitation de l'air (*fig.* 230). — Enfin, on le fait reposer sur deux fils de soie, tendus en croix à une petite distance du fond du vase extérieur; la chaleur transmise par la conductibilité des supports est alors négligeable.

336. Méthode de compensation, pour diminuer l'influence des pertes de chaleur éprouvées par le calorimètre. — Malgré les précautions que nous venons d'indiquer, les pertes de chaleur qu'éprouve le calorimètre ne sont jamais annulées. On peut en diminuer encore l'influence, en employant la *méthode de compensation*, qui est due à Rumford.

On fait en sorte que la température initiale *t* de l'eau du calorimètre soit inférieure, de 2 ou 3 degrés, à la température *t′* de l'air environnant, et on règle à l'avance le poids de cette eau, de façon que la température finale θ surpasse *t′* d'un nombre de degrés sensiblement égal à l'excès de *t′* sur *t*; alors, si l'on admet que le calorimètre emploie le même temps pour s'élever de *t* à t_1 que de *t′* à θ, il doit recevoir, de l'air et des corps environnants, autant de chaleur pendant la première période qu'il leur en cède pendant la seconde, en sorte que la perte et le gain de chaleur doivent se compenser sensiblement.

Cependant, l'hypothèse que l'on fait ici, sur la durée de ces deux périodes,

n'est qu'approximativement exacte. En réalité, le corps cède d'autant plus rapidement sa chaleur à l'eau, qu'il y a une plus grande différence entre sa température et celle de l'eau : le calorimètre met donc moins de temps pour s'élever de t à t' que pour s'élever ensuite de t' à θ. Il est préférable, pour cette raison, de régler la quantité d'eau de manière que la différence $\theta - t'$ atteigne seulement à peu près à la moitié de $t' - t$.

337. Calorimètre de M. Berthelot. — Le calorimètre employé par M. Berthelot rend inutiles toutes les corrections relatives au rayonnement. — Le calorimètre CC, en laiton doré, est muni d'un couvercle, qui laisse passer la tige du thermomètre (*fig.* 231) ; il repose par trois pointes de liège sur le fond d'une enveloppe protectrice AA, en laiton argenté à l'intérieur ; cette première enceinte est au centre d'un cylindre à double paroi DE en fer-blanc ; l'intervalle des deux parois est rempli d'eau ; ce cylindre est encore recouvert d'un carton qui laisse passer la tige du thermomètre ; enfin le tout est entouré d'un feutre épais.

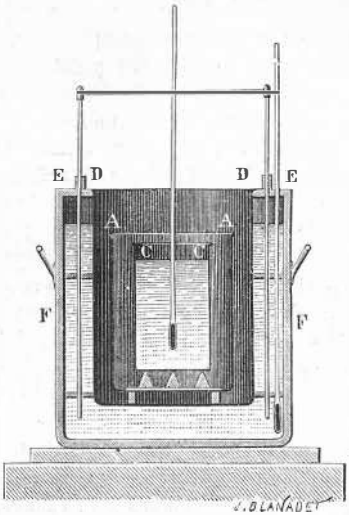


Fig. 231. — Calorimètre de M. Berthelot.

— Le calorimètre est ainsi protégé contre toute cause extérieure de refroidissement ou de réchauffement, notamment contre le rayonnement dû au voisinage de l'observateur. L'expérience montre que la température finale θ demeure très longtemps stationnaire.

338. Résultats. — Chaleurs spécifiques moyennes. — Le tableau suivant donne les chaleurs spécifiques de quelques corps solides et liquides, d'après Regnault.

	CHALEURS SPÉCIFIQUES.		CHALEURS SPÉCIFIQUES.
Acier	0.118	Fer	0,113
Antimoine	0,051	Iode	0,054
Argent	0,057	Laiton	0,094
Arsenic	0,081	Mercure	0,033
Bismuth	0,051	Nickel	0,109
Cadmium	0,057	Or	0,032
Carbone (charbon de bois)	0.241	Palladium	0,059
— (diamant)	0.147	Phosphore	0,189
— (graphite)	0,202	Platine	0,032
Cobalt	0,108	Plomb	0,031
Cuivre	0,095	Sélénium	0.084
Eau	1,000	Soufre	0.203
Essence de térébenthine	0,426	Verre	0;198
Étain	0,056	Zinc	0,096

Tous les nombres de ce tableau sont inférieurs à 1, excepté celui qui représente la chaleur spécifique de l'eau, prise pour une unité. — Il en résulte que, de tous les corps solides ou liquides, c'est l'eau qui a la plus grande chaleur spécifique. C'est là une remarque importante, comme on le verra, au point de vue du rôle que joue l'eau dans la répartition des températures à la surface du globe, et dans un grand nombre d'autres phénomènes.

On remarquera qu'un même corps, comme le carbone, peut avoir, sous des états différents, des chaleurs spécifiques très différentes.

Enfin, Dulong et Petit avaient constaté déjà que, si l'on détermine la chaleur spécifique d'un corps, par une expérience effectuée entre 0° et 100°, puis la chaleur spécifique du même corps, par une expérience effectuée entre 0° et 200°, la seconde expérience fournit, en général, un résultat sensiblement plus grand que la première. — Les nombres déterminés par les méthodes précédentes n'expriment donc, pour chaque corps, que la *chaleur spécifique moyenne*, entre les deux températures extrêmes par lesquelles ce corps a passé dans chaque expérience. — Pour la plupart des corps et surtout pour les liquides, la chaleur spécifique augmente, lorsque la température s'élève.

339. Chaleurs spécifiques des gaz, sous pression constante. — La méthode des mélanges peut également servir à déterminer les chaleurs spécifiques des gaz *sous pression constante*.

On peut concevoir, en effet, qu'une masse de gaz un peu considérable ayant été portée à une température assez élevée et exactement connue, on lui fasse traverser un serpentin environné d'eau froide, et qu'on mesure l'élévation de température de l'eau. Si l'appareil est disposé de manière que le gaz conserve la même pression, un calcul semblable à celui qui a été effectué plus haut (332) fera connaître la chaleur spécifique de ce gaz *à pression constante*.

C'est une méthode de ce genre qui a été appliquée par Regnault, en perfectionnant un procédé qui avait été employé par Delaroche et Bérard. — Voici, d'après Regnault, les *chaleurs spécifiques* des principaux gaz sous la pression de l'atmosphère, c'est-à-dire les quantités de chaleur nécessaires pour élever d'un degré la température de l'*unité de masse* de chacun d'eux, la *pression restant constante*.

CHALEURS SPÉCIFIQUES DE QUELQUES GAZ, SOUS LA PRESSION CONSTANTE D'UNE ATMOSPHÈRE.

Acide carbonique	0,216	Brome (vapeur de)	0,056
— chlorhydrique	0,185	Chlore	0,121
— sulfhydrique	0,245	Hydrogène	3,409
— sulfureux	0,155	— bicarboné	0,369
Air	0,238	— protocarboné	0,593
Ammoniaque	0,508	Oxyde de carbone	0,248
Azote	0,244	Oxygène	0,218
Bioxyde d'azote	0,232	Protoxyde d'azote	0,224

340. Chaleurs spécifiques des gaz, à volume constant. — Chaleur de dilatation. — On peut encore envisager la chaleur spécifique d'un gaz sous un point de vue différent de celui qui précède.

Quand l'unité de masse d'un gaz éprouve un *accroissement de température* d'un degré, sans variation de pression, ce gaz éprouve en même temps, par cela même, un *accroissement de volume*, et la quantité de chaleur qui lui a été fournie doit être considérée comme ayant produit à la fois ces deux effets. — Or, on peut imaginer que ces deux effets, au lieu d'être simultanés, soient réalisés d'une manière successive ; on peut concevoir la succession des deux phénomènes suivants :

1° L'unité de masse d'un gaz, assujettie d'abord à conserver un volume constant, recevra une quantité de chaleur capable d'élever sa température de 1 degré : cette quantité de chaleur est ce qu'on nommera la *chaleur spécifique à volume constant;* nous savons que le gaz éprouvera une augmentation de pression; — 2° on fera éprouver ensuite à ce gaz un accroissement de volume tel, que la pression reprenne sa valeur primitive, sans que la température s'abaisse : il faudra, pour cela, lui communiquer une nouvelle quantité de chaleur, que l'on peut appeler *chaleur de dilatation*. — L'effet définitif étant évidemment le même que si le gaz avait été chauffé en conservant toujours la même pression, on voit que la *chaleur spécifique à pression constante* est la somme de la *chaleur spécifique à volume constant* et de la *chaleur de dilatation*. Si l'on désigne ces trois quantités de chaleur respectivement par C, c et l, on a

$$C = c + l$$

Le tableau précédent donne, pour chaque gaz en particulier, la valeur de C; si l'on pouvait déterminer la valeur de c, on en déduirait la valeur de l, ou réciproquement.

Or, il serait extrêmement difficile d'appliquer, à la détermination directe de la *chaleur spécifique à volume constant* c, une méthode semblable aux précédentes. En effet, il faudrait enfermer le gaz dans une enveloppe solide, rendant ses variations de volume sensiblement nulles; le porter d'abord à une température connue, et l'introduire ensuite, avec son enveloppe, dans un calorimètre dont on mesurerait l'élévation de température. Or, il arriverait que, le poids de l'enveloppe étant nécessairement beaucoup plus grand que celui du gaz, le gaz n'exercerait sur les variations de température qu'une influence à peu près inappréciable. — La détermination directe de la *chaleur de dilatation* l présenterait des difficultés plus grandes encore. — Une méthode extrêmement ingénieuse, due à Laplace, et appliquée par Clément et Desormes, permet de résoudre la question, en fournissant la valeur du *rapport* des deux chaleurs spécifiques $\frac{C}{c}$ pour un même gaz.

L'expérience a montré que la valeur de ce rapport est sensiblement la même pour tous les gaz simples, et qu'elle est égale à 1,4. On obtiendra donc les chaleurs spécifiques des divers gaz à volume constant, en divisant les nombres du tableau précédent par 1,4.

341. Méthode de Laplace. — Soit 1 gramme d'un gaz à 0°, occupant un volume V; donnons-lui C calories, sa chaleur spécifique à pression constante, et supposons qu'il se dilate à pression constante; le volume devient $V + \alpha V$, et la température finale est 1°. Si nous comprimons ce gaz jusqu'à ce que le volume redevienne V, sa température s'élèvera d'une certaine quantité ω; elle deviendra $1 + \omega$. — Ainsi, quand on fournit à ce gaz C calories, si le volume reste constant, la température s'élève de $1 + \omega$ degrés. Par définition, si on lui donnait c calories, c'est-à-dire sa chaleur spécifique à volume constant, la variation de la température serait exactement de 1 degré. Les quantités de chaleur C et c sont proportionnelles aux variations de température $1 + \omega$ et 1; on a donc, en désignant par γ le rapport $\frac{C}{c}$ des deux chaleurs spécifiques :

$$\gamma = 1 + \omega$$

Remarquons que l'élévation de température ω correspond à la diminution αV du volume $V + \alpha V$; la diminution de l'unité de volume, ou *compression*, qui a produit cette élévation de température ω, est donc égale au rapport $\frac{\alpha V}{V + \alpha V}$, ou $\frac{\alpha}{1 + \alpha}$, ou sensiblement α, en négligeant $\frac{1}{273}$ vis-à-vis de l'unité.

Voici maintenant l'expérience, telle qu'elle sera effectivement réalisable. On prendra une masse de gaz occupant un volume quelconque V; on réduira instantanément son volume d'une petite quantité v, c'est-à-dire que l'on comprimera l'unité de volume de $\frac{v}{V}$, et on déterminera l'élévation de température θ, qui résultera de cette compression. La grandeur de l'échauffement sera proportionnelle à la grandeur de la compression, c'est-à-dire qu'on aura $\frac{\omega}{\theta} = \frac{\alpha}{\left(\frac{v}{V}\right)}$, d'où l'on tirera la valeur de ω, et par suite le rapport γ, si $\frac{v}{V}$ et θ sont mesurés avec précision. — Ce sont ces mesures que permet d'effectuer, comme on va le voir, l'expérience de Clément et Desormes.

342. Expérience de Clément et Desormes. — Un ballon de verre, d'une très grande capacité (50 à 40 litres), communique avec un tube vertical V (*fig.* 232), qui plonge dans une cuvette contenant de l'acide sulfurique concentré, ou tout autre liquide non volatil. — Le robinet supérieur R étant fermé, on fait communiquer le ballon avec une pompe à main, par l'intermédiaire du robinet latéral R′, et on enlève une très petite quantité d'air. On ferme le robinet, et on attend que l'air intérieur, un peu refroidi par la raréfaction, ait repris la température extérieure, que nous supposerons être 0°. Soit alors P la pression barométrique, et soit P′ la pression de l'air intérieur, mesurée au moyen de l'ascension du liquide dans le tube V.

L'expérience étant ainsi préparée, on ouvre et on referme immédiatement le robinet supérieur R : ce robinet étant très gros, cette opération a suffi pour laisser entrer dans le ballon la petite quantité d'air capable de rétablir instantanément l'égalité des niveaux à l'intérieur et à l'extérieur du tube V.

— Mais l'air extérieur, en pénétrant dans le ballon, a comprimé l'air qui y était primitivement contenu, et l'a échauffé; en sorte que, à mesure que le gaz revient à la température ambiante, la pression intérieure diminue. On voit le liquide s'élever lentement dans le tube V, et conserver finalement un niveau stationnaire. Soit alors P″ la pression intérieure, fournie par l'observation de ce niveau : elle est plus petite que la pression extérieure P, mais plus grande que P′, puisque l'appareil contient, à la température extérieure, un peu plus d'air qu'au commencement de l'expérience. — La connaissance

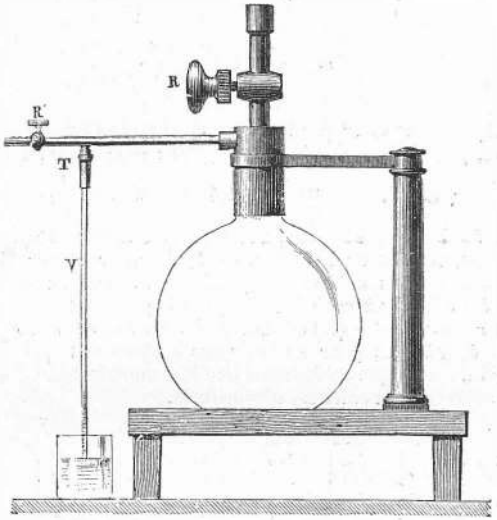


Fig. 232. — Expérience de Clément et Desormes.

de ces trois pressions P, P′, P″, va nous suffire pour calculer : 1° la *compression* produite sur l'air primitivement contenu dans le ballon, par la rentrée de l'air extérieur; 2° l'*élévation de température* due à cette compression.

Soit V le volume du ballon, v le volume occupé par l'air extérieur qui a pénétré dans le ballon, lors de l'ouverture du robinet R ; le volume *de la masse d'air primitive* a donc diminué de v ; la compression a été $\frac{v}{V}$; soit θ l'élévation de température. — En reprenant les phases successives de l'expérience, on voit que la masse d'air primitive occupait d'abord le volume V, sous la pression P′ et à la température 0° ; immédiatement après la compression, elle a occupé le volume $V - v$, sous la pression P, à la température θ ; enfin, une fois l'équilibre établi, elle occupe le volume $V - v$, sous la pression P″, à la température 0°. — Les conditions relatives aux trois états successifs sont donc :

(1)	V	P′	0°.
(2)	$V - v$	P	θ.
(3)	$V - v$	P″	0°.

La comparaison du premier et du troisième état donne, d'après la loi de Mariotte, l'équation

$$(1) \qquad VP' = (V - v)\,P'';$$

la comparaison du deuxième et du troisième état donne, d'après la loi de Gay-Lussac :

$$(2) \qquad P = P''(1 + \alpha\theta).$$

De ces deux équations, on tire :

$$\frac{v}{V} = \frac{P'' - P'}{P''} \qquad \alpha\theta = \frac{P - P''}{P''}.$$

et enfin :

$$\omega = \frac{\alpha\theta}{\left(\frac{v}{V}\right)} = \frac{P - P''}{P'' - P}.$$

En remplaçant P, P′ et P″ par les valeurs que fournit l'expérience, on trouve sensiblement, pour l'air et tous les gaz simples : $\omega = 0{,}4$. On a donc :

$$\gamma = 1{,}4, \qquad C = c \times 1{,}4 \qquad \text{et} \quad c = \frac{C}{1{,}4}.$$

343. Loi de Dulong et Petit, relative aux chaleurs spécifiques des corps simples, solides ou liquides. — Après avoir mesuré les chaleurs spécifiques d'un grand nombre de *corps simples*, solides ou liquides, Dulong et Petit ont été conduits à cette loi, que, pour la plupart de ces corps, *le produit de la chaleur spécifique c par l'équivalent chimique* E *est un nombre constant* et égal à 3,2; pour quelques-uns seulement, le produit est égal à 6,4. Cette loi n'est qu'approchée, ainsi que le montre le tableau suivant; pour le carbone notamment, l'écart est considérable.

CORPS SIMPLES.	E	c	cE	CORPS SIMPLES.	E	c	cE
Carbone. . . .	6	0,25	1,5	Phosphore. . .	31	0,189	5,9
Magnésium. . .	12	0,25	3	Potassium . .	39	0,165	6,4
Soufre.	16	0,20	3,2	Brome.	80	0,08	6,4
Fer	28	0,11	3,1	Argent.	108	0,057	6,2
Cuivre.	32	0,096	3	Iode.	127	0,054	6,9
Zinc.	33	0,095	3,1				
Or.	98	0,032	3,1				
Mercure. . . .	100	0,033	3,3				

Admettons avec Ampère que, la masse de l'atome d'hydrogène étant prise pour unité, les masses des atomes de phosphore, de potassium, de brome, d'argent et d'iode soient égales à leurs équivalents chimiques respectifs, 31, 39, 80, 108 et 127; que, pour les autres corps simples, en plus grand nombre, la masse de l'atome soit représentée par le double de l'équivalent chimique. La masse de l'atome ou *poids atomique* sera alors A = E pour quelques corps simples, A = 2E pour la plupart des corps simples. On pourra dire que *le produit* cA *de la chaleur spécifique par le poids atomique est un nombre constant, égal à* 6,4, *pour les corps simples solides ou liquides.*

344. Loi de Wœstyn. — *La capacité calorifique d'un corps composé, à l'état solide, est égale à la somme des capacités caloriques de ses éléments, considérés sous le même état physique.* — Ainsi, 44 grammes de sulfure de fer contiennent 28 grammes de fer et 16 grammes de soufre, dont les chaleurs spécifiques sont 0,11 et 0,20; si l'on désigne par x la chaleur spécifique du sulfure de fer, on doit avoir : $44 \times x = 28 \times 0{,}11 + 16 \times 0{,}20$; d'où $x = 0{,}14$; c'est en effet ce que donne l'expérience.

L'exactitude de la loi de Wœstyn est bien mieux établie que celle de la loi de Dulong et Petit. — Par exemple, étant donnée la chaleur spécifique d'un oxyde métallique et celle du métal qui entre dans sa constitution, on peut, en s'appuyant sur la loi de Wœstyn, calculer la chaleur spécifique de l'oxygène, *à l'état solide*; ce calcul, effectué sur un oxyde quelconque, fournit toujours le même résultat.

345. Loi de Delaroche et Bérard. — A la suite d'expériences assez défectueuses, Delaroche et Bérard avaient constaté que *la capacité calorifique de l'unité de volume des divers gaz simples* (oxygène, hydrogène, azote,....) *est la même*. C'est ce que les expériences ultérieures ont vérifié d'une manière plus précise.

Or, si l'on prend comme unité de volume le volume occupé par 1gr d'hydrogène, l'unité de volume d'azote pèse 14 grammes; la capacité calorifique de l'unité de volume d'azote s'obtient donc en faisant le produit de sa chaleur spécifique par le nombre 14, qui exprime aussi sa densité par rapport à l'hydrogène ou son *poids atomique*. La loi de Delaroche et Bérard peut alors s'énoncer comme la loi de Dulong et Petit relative aux corps simples solides;

Le produit CA *de la chaleur spécifique d'un gaz simple par le poids atomique de ce gaz est un nombre constant, égal à* 5,4.

	A	C	CA		A	C	CA
Hydrogène. .	1	3,409	3,409	Oxygène. . .	16	0,217	3,472
Azote	14	0,244	3,416	Chlore. . . .	35,5	0,121	4,295

II. — MESURE DES CHALEURS DE FUSION ET DE VAPORISATION.

346. Chaleur de fusion. — On nomme *chaleur latente de fusion* d'un corps, ou simplement *chaleur de fusion, la quantité de chaleur qu'absorbe 1 gramme de ce corps, pour fondre sans élévation de température.* — Ainsi, la chaleur de fusion de la glace est la quantité de chaleur qu'il faut fournir à 1 gramme de glace à 0°, pour le transformer en eau liquide, à la même température.

347. Détermination de la chaleur de fusion de la glace. — Méthode des mélanges. — Dans un calorimètre V (*fig.* 229), contenant un poids connu d'eau M, à une température t supérieure de quelques degrés à celle de l'air environnant, on plonge un morceau de glace à 0°, après l'avoir essuyé avec du papier buvard; on agite le liquide pour hâter la fusion, et l'on note la température finale θ du mélange. Quant au poids P de la glace, on ne peut songer à l'obtenir avant l'expérience, par une pesée directe, pendant laquelle il serait impossible d'éviter la fusion : on le détermine, une fois l'expérience terminée, par l'accroissement de poids du calorimètre. — On exprime que la quantité de chaleur abandonnée par l'eau et par le calorimètre, qui se sont refroidis ensemble de t à 0, a été employée, d'une part à fondre la glace, d'autre part à échauffer de 0° à θ l'eau provenant de la fusion.

La quantité de chaleur abandonnée par l'eau est M $(t - 0)$; quant au calorimètre, si l'on désigne par p son poids et par c la chaleur spécifique du laiton, il a perdu $pc\ (t - 0)$. D'autre part, si l'on désigne par x la chaleur de fusion de la glace, le poids P a absorbé, en fondant, une quantité de chaleur Px; les P grammes d'eau qui proviennent de la fusion ont absorbé ensuite, en s'échauffant de 0° à 0, une quantité de chaleur P0. On aura donc l'équation

$$(M + pc)\ (t - 0) = Px + P0,$$

d'où l'on tirera la valeur de x.

En opérant ainsi, de la Provostaye et Desains ont trouvé, pour la chaleur de fusion de la glace, le nombre 79,25.

348. Méthode de Bunsen. — Le calorimètre à glace de Bunsen (351) peut aussi servir à déterminer la chaleur de fusion de la glace. Soit k la constante du calorimètre, c'est-à-dire le nombre de divisions dont rétrograde le mercure dans le tube gradué, quand on cède à l'appareil une calorie; k est déterminé par une expérience calorimétrique; un jaugeage fera connaître le volume v d'une division du tube; kv est donc la contraction qui correspond à une calorie. — Bunsen a déterminé la diminution de volume que subit 1 gramme de glace à 0°, au moment de la fusion; il a trouvé $0^{cmc},09069$. Cette contraction correspond à l'absorption de x calories, x désignant la chaleur de fusion; on a donc la proportionnalité

$$\frac{x}{1} = \frac{0,09069}{kv};$$

en remplaçant kv par sa valeur, on trouve $x = 80^{c},45$.

349. Détermination des chaleurs de fusion des diverses substances. — Proposons-nous maintenant de déterminer, par la méthode des mélanges, la chaleur de fusion d'un corps qui soit solide à la température ordinaire, et dont le point de fusion ne soit pas très supérieur à 100°, de manière que ce corps puisse être introduit *en fusion* dans l'eau, sans donner naissance à un dégagement appréciable de vapeur d'eau. On introduira un poids connu P de ce corps, à une température T supérieure à son point de fusion, dans une masse d'eau M à une température t, et on déterminera la température finale 0. — On obtiendra l'équation du problème en égalant : d'une part, la quantité de chaleur gagnée par l'eau et le calorimètre, en s'échauffant de t à 0; d'autre part, la somme des quantités de chaleur que le corps a perdues, 1° en se refroidissant depuis la température T jusqu'à la température T′ de sa solidification, 2° en se solidifiant, 3° en se refroidissant de T′ à 0 degrés. — En désignant par γ et γ' les chaleurs spécifiques du corps à l'état liquide et à l'état solide, on aura

$$(M + pc)\ (0 - t) = P\gamma\ (T - T') + Px + P\gamma'\ (T' - 0).$$

Si les chaleurs spécifiques γ et γ' ne sont pas connues, on fera deux autres expériences, avec des poids notablement différents; on aura ainsi, en tout, trois équations, qui serviront à calculer x, γ et γ'.

Voici quelques-uns des résultats obtenus :

	POINT DE FUSION.	CHALEUR DE FUSION.	CHALEUR SPÉCIFIQUE À L'ÉTAT solide.	CHALEUR SPÉCIFIQUE À L'ÉTAT liquide.
Bismuth	262°	12,64	0,031	0,036
Eau	0	80	0,504	1,000
Étain	230	14,25	0,056	0,064
Mercure	—40	2,82	0,032	0,033
Phosphore	44	5,05	0,19	0,20
Plomb	320	9,37	0,031	0,040
Soufre	115	9,37	0,203	0,234
Zinc	430	28,13	0,095	»

350. Chaleurs de vaporisation. — On nomme *chaleur latente de vaporisation* d'un liquide, ou simplement *chaleur de vaporisation, à une température déterminée, la quantité de chaleur qu'absorbe 1 gramme de ce liquide, à cette température, pour se transformer en vapeur saturante.* — Ainsi, la chaleur de vaporisation de l'eau, à 100°, est la quantité de chaleur qu'il faut donner à 1 gramme d'eau, déjà chauffé à 100°, pour le transformer en vapeur saturante à la même température.

351. Détermination de la chaleur de vaporisation de l'eau à 100°. — Les premières expériences précises sur la chaleur de vaporisation de l'eau ont été faites par Despretz.

La cornue A (*fig.* 233) contient de l'eau, qu'on portera à l'ébullition ; elle communique par le tube *tt* avec un calorimètre, dont la coupe est représentée par la figure 234 ; *ss* est un serpentin qui vient s'ouvrir dans une boîte métallique *bb'*, entourée de tous côtés par l'eau du calorimètre. Un agitateur *mnm'n'* sert à rendre uniforme la température de cette eau : l'écran MN (*fig.* 233) préserve le calorimètre contre le rayonnement du fourneau (*).

Pour que la pression intérieure reste constamment égale à la pression atmosphérique, on a adapté à la partie supérieure de la boîte *bb'* (*fig.* 234) un petit tube métallique vertical ; le robinet *r'* qui le termine reste ouvert pendant l'expérience actuelle. La vapeur arrive dans le serpentin, où elle se liquéfie ; l'eau provenant de cette condensation se rassemble dans la caisse *bb'* et y prend la température du calori-

(*) Il importe d'éviter que la vapeur n'entraîne mécaniquement avec elle, dans le calorimètre, des particules d'eau liquide ; dans ce but, on incline le tube de prise de vapeur, comme le montre la figure 233, et on le fait plonger assez avant dans la cornue. La vapeur qui y pénètre se trouve ainsi, sur une portion de son parcours, protégée contre le refroidissement par la vapeur qui l'enveloppe ; s'il s'en liquéfie un peu, elle retombe à l'état liquide dans la cornue.

Pour n'admettre la vapeur dans le calorimètre que lorsque l'eau est en pleine ébullition, on a placé sur le tube *tt'* un robinet R à trois voies, semblable à celui que représente la figure 122 ; il permet de faire communiquer à volonté la cornue avec l'extérieur ou avec le serpentin. On établit d'abord la première communication ; puis, quand l'eau est en pleine ébullition, on tourne le robinet, de manière à faire arriver la vapeur dans le calorimètre.

mètre. L'expérience terminée, on note la température du calorimètre; puis, ouvrant le robinet r, on recueille l'eau condensée et on la pèse. — On exprime alors que la quantité de chaleur gagnée par l'eau et par le calorimètre est égale à la somme des quantités de chaleur cédées, 1° par la vapeur en se liquéfiant, 2° par l'eau condensée en se refroidissant depuis 100° jusqu'à la température finale.

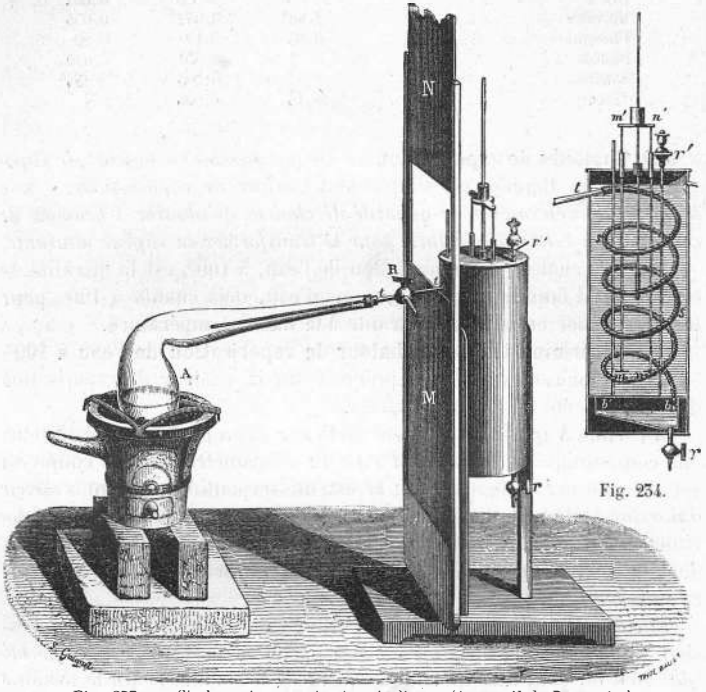


Fig. 253. — Chaleur de vaporisation de l'eau. (Appareil de Despretz.)

Soit t la température initiale du calorimètre, M le poids de l'eau qu'il contient, p le poids du serpentin et du calorimètre, et c la chaleur spécifique du cuivre; soit P le poids de la vapeur condensée, T la température d'ébullition, x la chaleur de vaporisation de l'eau, et θ la température finale; on aura l'équation

$$(M + pc)(\theta - t) = Px + P(T - \theta),$$

d'où l'on tirera la valeur de x.

Despretz a trouvé, pour la chaleur de vaporisation de l'eau à 100°, le nombre 540. — Des expériences plus précises de Regnault ont donné 537.

352. Chaleur de vaporisation de l'eau à diverses températures. — Pour déterminer la chaleur de vaporisation de l'eau à des températures autres que 100°, il suffit d'augmenter ou de diminuer la pression, de manière à faire bouillir l'eau à la température voulue ; c'est à quoi l'on peut arriver en faisant communiquer l'intérieur de l'appareil, par l'intermédiaire du robinet r', soit avec une pompe de compression, soit avec une machine pneumatique, selon que l'on veut obtenir l'ébullition au-dessus de 100° ou au-dessous de 100°.

353. Chaleur totale de vaporisation de l'eau. — On nomme *chaleur totale de vaporisation de l'eau, à une température déterminée* t, *la quantité de chaleur qu'il faut fournir à* 1 *gramme d'eau liquide à* 0°, *pour le transformer en vapeur saturante à la température* t.

La chaleur spécifique de l'eau liquide étant toujours sensiblement égale à l'unité, si la chaleur de vaporisation était une constante λ, indépendante de la température de vaporisation, la chaleur totale de vaporisation à t degrés serait toujours exprimée par la somme $t + \lambda$. — Les expériences de Regnault ont montré qu'il n'en est pas rigoureusement ainsi, mais que la chaleur totale de vaporisation de l'eau à une température t est représentée par la formule empirique :

$$\text{Chal. tot.} = 606{,}5 + 0{,}305\,t.$$

Si l'on en retranche la quantité de chaleur nécessaire pour élever 1 gramme d'eau de 0° à t, c'est-à-dire le nombre t lui-même, on obtient pour valeur de la chaleur latente de vaporisation λ, à la température t :

$$\lambda = 606{,}5 - 0{,}695\,t.$$

354. Chaleurs de vaporisation des divers liquides. — Des méthodes semblables, appliquées à divers liquides, ont donné pour les valeurs de la chaleur de vaporisation, sous la pression de l'atmosphère, les résultats suivants :

	POINTS D'ÉBULLITION.	CHALEURS DE VAPORISATION.
Acide acétique	120°	102
Alcool	78,5	208
Eau	100	537
Esprit de bois	66,5	264
Essence de térébenthine	161	69
Éther sulfurique	35,5	91

De tous les liquides, l'eau est, comme on le voit, celui pour lequel la chaleur de vaporisation a la plus grande valeur.

III. — MESURE DES CHALEURS DE COMBINAISON.

355. Quantités de chaleur dégagées ou absorbées dans les phénomènes chimiques. — Lorsque deux ou plusieurs corps, mis en présence à une même température t_0, arrivent à se combiner entre eux, l'expérience montre qu'il y a toujours élévation de température, c'est-à-dire que la réaction chimique produit un *dégagement de chaleur*. —

Or, supposons que l'expérience soit disposée de façon que toute cette chaleur puisse se communiquer aux corps environnants, en sorte que les produits de la réaction reviennent à la température initiale t_0 : la mesure de la quantité de chaleur qui aura été absorbée par les corps environnants fournira une évaluation de la chaleur dégagée par la combinaison elle-même.

Quant à la disposition expérimentale à employer pour mesurer ces quantités de chaleur, on voit qu'il suffira d'effectuer les réactions au sein d'un calorimètre ayant une masse assez considérable pour que la température finale, commune au calorimètre et aux produits de la réaction, ait une valeur t' peu différente de la température initiale t_0. — En tenant compte des chaleurs spécifiques des produits de la réaction, on obtiendra une équation qui donnera la valeur de la quantité de chaleur dégagée ou absorbée, pour l'unité de poids de l'un des corps employés. — Il sera facile enfin d'en déduire la *chaleur de combinaison* du composé formé; on appelle ainsi la quantité de chaleur correspondante à la formation de E grammes du composé, E représentant son équivalent chimique.

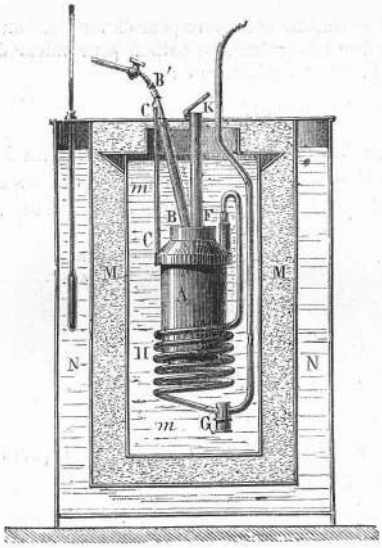


Fig. 255. — Calorimètre à eau de Favre et Silbermann.

La chaleur de combinaison est le plus souvent assez considérable; aussi, l'exprime-t-on habituellement en grandes calories. Par exemple, la chaleur de combinaison de l'eau à l'état liquide est 34 500 calories, ou, en grandes calories, $34^{cal},5$.

356. Calorimètres de Favre et Silbermann. — Lorsque, parmi les éléments ou les produits de la réaction, se trouvent des gaz ou des vapeurs, on doit faire usage d'un calorimètre du genre de celui qui a été employé par MM. Fabre et Silbermann (*fig.* 255).

Les gaz sont amenés par des tubes tels que BB′ et CC′, dans un cylindre métallique A, où s'effectue la réaction; un tube plus large FK, fermé à sa partie supérieure par une plaque de verre, permet à l'opérateur de voir ce qui se passe dans l'appareil. Les produits gazeux de la réaction traversent, avant de s'échapper dans l'atmosphère, le serpentin H, à la partie inférieure duquel se trouve une petite boîte G destinée à recueillir les liquides résultant de la condensation

des vapeurs. Le cylindre A et le serpentin sont placés dans une masse d'eau *mm*, contenue dans un vase calorimétrique : c'est la variation de température de cette eau qui servira à évaluer la quantité de chaleur correspondante à la réaction. — Pour éviter la déperdition de chaleur, on place le calorimètre dans une enceinte métallique MM, contenant du duvet de cygne. Enfin, le tout est placé dans un vase NN, rempli d'eau, pour éliminer l'influence des variations de la température ambiante : un thermomètre permet de s'assurer que la température de cette eau est restée constante pendant l'expérience.

Cette disposition expérimentale a été perfectionnée par M. Berthelot, de manière à faire disparaître à peu près complètement les causes d'erreur.

Pour les réactions dans lesquelles n'intervient aucun corps gazeux, Favre et Silbermann ont fait usage d'un calorimètre dans lequel le corps calorimétrique est une masse considérable de mercure, qui indique, par ses variations de volume, les variations de température qu'elle éprouve.

Le mercure est contenu dans un gros réservoir sphérique en fer R (*fig.* 256),

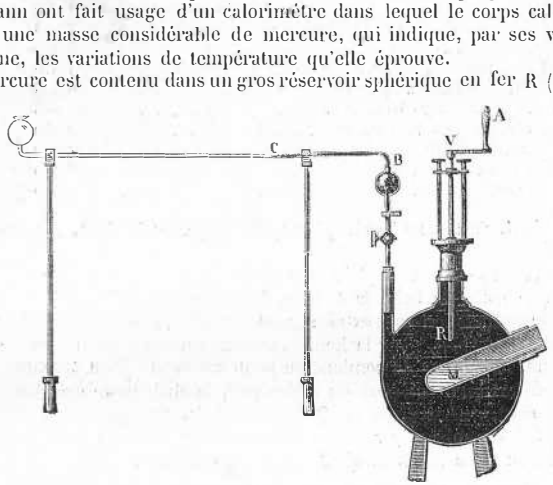


Fig. 256. — Calorimètre à mercure de Favre et Silbermann.

communiquant avec une tige de verre capillaire BC, sur laquelle ont été tracées des divisions. Dans le réservoir pénètrent plusieurs moufles, tels que M, dans lesquels s'effectueront les réactions chimiques. — Avant l'expérience, on commence par amener l'extrémité de la colonne de mercure, dans la tige BC, en un point voisin de l'origine des divisions : il suffit, pour cela, de faire tourner la manivelle A, de manière à faire pénétrer plus ou moins profondément dans le réservoir le petit cylindre fixé à l'extrémité de la vis V. — On détermine alors, par une expérience préliminaire, quel est le déplacement de la colonne mercurielle qui correspond à un nombre déterminé de calories, par exemple à la chaleur que dégage un poids connu d'eau, en se refroidissant d'un nombre connu de degrés, dans un des moufles du calorimètre. — L'appareil étant ainsi préparé, la quantité de chaleur dégagée dans une réaction quelconque, produite dans l'un des moufles, pourra être évaluée à l'aide du déplacement de l'extrémité de la colonne de mercure dans la tige BC. — Pour éviter la déperdition de chaleur, on enferme le réservoir du calorimètre dans une boîte de bois contenant du duvet de cygne.

357. Chaleur de combustion des principaux corps combustibles. — Parmi les résultats qu'a fournis l'étude des diverses réactions chimiques,

nous signalerons, en particulier, ceux qui sont relatifs aux quantités de chaleur dégagées dans les combustions, c'est-à-dire dans les phénomènes de combinaison directe des corps avec l'oxygène. — Nous appellerons *chaleur de combustion* d'un corps, le nombre de calories dégagées par la combinaison de 1 gramme de ce corps avec l'oxygène.

Le tableau suivant donne, en petites calories, les valeurs approximatives de la chaleur de combustion, pour les principaux corps combustibles.

	CHALEURS DE COMBUSTION.
Hydrogène (produisant de l'eau à l'état liquide). .	34 500
— (— — à l'état gazeux). .	29 400
Carbone (produisant de l'acide carbonique). . . .	7 850
Soufre (produisant de l'acide sulfureux).	2 269
Phosphore (produisant de l'acide phosphorique). .	5 870
Protocarbure d'hydrogène C^2H^4.	15 125
Bicarbure d'hydrogène C^4H^4.	11 860
Essence de térébenthine.	10 850
Huile d'olive	9 860
Alcool.	7 180
Éther.	9 050

A poids égal, c'est donc l'hydrogène qui dégage, en brûlant, la plus grande quantité de chaleur.

Quant aux corps qu'on emploie le plus fréquemment comme *combustibles*, la houille, le coke, le bois, la tourbe, les nombres qui représentent leurs chaleurs de combustion sont extrêmement variables, suivant le degré de pureté de ces corps. — Ainsi, pour la houille, suivant qu'elle contient plus ou moins d'hydrogène, la chaleur de combustion peut varier de 7300 à 8900. — Pour le coke, suivant qu'il est plus ou moins pur, la chaleur de combustion varie de 6500 à 7500. — Les diverses qualités de bois, préalablement desséchées, fournissent des nombres qui varient entre 2600 et 3000. — Enfin, les chaleurs de combustion de la tourbe varient entre 5000 et 5400.

CHAPITRE X

CHAUFFAGE ET MACHINES A VAPEUR

I. — NOTIONS SUR LES DIVERS MODES DE CHAUFFAGE.

358. Appareils de chauffage usuels. — Foyers découverts, poêles. — Les appareils employés le plus ordinairement pour le chauffage de nos habitations peuvent se rapporter à deux types principaux : les *foyers découverts* et les *poêles*.

Dans les *foyers découverts*, ou cheminées d'appartements, on n'utilise que la chaleur rayonnée par le combustible : l'air et les gaz qui s'échappent par la cheminée emportent avec eux une grande quantité de chaleur, qui ne contribue pas au chauffage.

Les *poêles* utilisent une fraction beaucoup plus considérable de la chaleur dégagée par le combustible : en effet, leurs parois, et celles des tuyaux placés dans l'appartement, transmettent une grande quantité de chaleur, soit sous forme de chaleur rayonnante, soit en échauffant par contact l'air qui se renouvelle sans cesse autour d'eux.

Mais, si les poêles donnent ainsi un chauffage plus économique que les foyers découverts, ils ne présentent généralement pas les mêmes avantages, au point de vue de l'hygiène. En effet, pour obtenir des conditions de salubrité suffisantes dans les pièces habitées, c'est-à-dire pour fournir la quantité d'oxygène nécessaire à la respiration, et enlever les émanations produites par la transpiration pulmonaire ou cutanée, il faut assurer un renouvellement de l'air correspondant au moins à 6 ou 8 mètres cubes par individu et par heure. Or, les ouvertures des poêles ne livrent généralement passage qu'à la quantité d'air nécessaire à la combustion; aussi l'usage en est-il insalubre, quand la ventilation n'est pas assurée d'une autre manière.

Il n'est pas de même des foyers découverts, dont les larges ouvertures produisent un appel d'air beaucoup plus considérable. — On peut d'ailleurs mieux utiliser la chaleur produite, en établissant, autour des parois du foyer, des espaces où l'on fait arriver l'air extérieur, par des conduits s'ouvrant au dehors de l'édifice; cet air, après s'être échauffé, vient se rendre dans l'appartement par des *bouches de chaleur*.

359. Chauffage des grands édifices. — Dans les grands édifices, on préfère le plus souvent installer un système général de chauffage. Ces systèmes sont assez nombreux; nous en indiquerons seulement les principes généraux.

Le *chauffage par l'air chaud* consiste à introduire, dans les pièces, de l'air pris au dehors, mais préalablement échauffé dans des tuyaux qui traversent un calorifère placé dans les caves de l'édifice. Ce mode de chauffage n'est avantageux que si l'air échauffé n'a pas un trop long trajet à parcourir, avant d'arriver aux pièces dans lesquelles il doit être distribué.

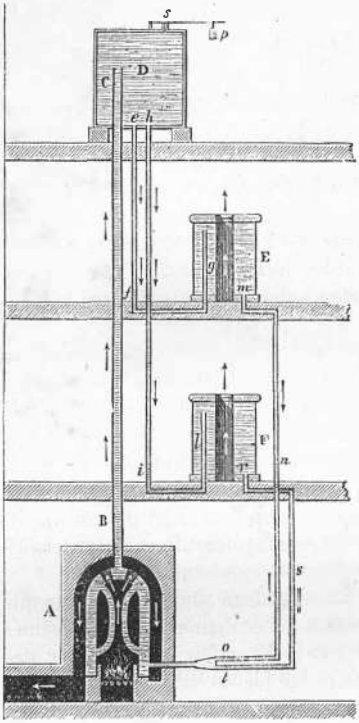


Fig. 257.
Chauffage par circulation d'eau chaude.

Le *chauffage par circulation d'eau chaude* exige un appareil plus compliqué; la figure 257 en indique les dispositions essentielles. Il se compose : 1° d'une chaudière A, placée dans les caves; 2° d'un tuyau d'ascension BC, partant du sommet de la chaudière et débouchant dans un réservoir D établi dans les combles; 3° d'une première série de tuyaux descendants *efg*, *hil*, qui distribuent l'eau du réservoir D dans des poêles E, F; 4° d'une autre série de tuyaux descendants *mno*, *rsl*, qui ramènent l'eau des poêles à la chaudière.

La chaudière A est ordinairement en forme de cloche; et à foyer intérieur, afin de présenter une surface de chauffe aussi grande que possible; elle est entièrement pleine d'eau, de même que le réservoir D, les poêles et les tuyaux. Le réservoir D, qu'on nomme *vase d'expansion*, est muni d'une soupape *s*, analogue à celle de la marmite de Papin (*fig.* 207); cette soupape sert à livrer passage à l'air qui se dégage de l'eau sous l'influence de la chaleur, et à régler la pression dans l'appareil. — Chacun des poêles E, F, est formé de deux parois cylindriques concentriques : l'espace compris entre les deux parois renferme de l'eau; dans le cylindre intérieur s'échauffe l'air amené de dehors par

des tuyaux placés sous le plancher. — L'eau échauffée dans la chaudière monte dans le tuyau BC, et gagne la partie supérieure du vase d'expansion; en même temps, l'eau moins chaude dont elle prend la place descend par les tubes *efg*, *hil*, et se rend aux poêles. Enfin, la circulation se complète par les tubes *mno*, *rst*, qui ramènent l'eau à la chaudière.

L'eau étant le corps qui a la plus grande chaleur spécifique (338), les variations qui peuvent se produire dans l'activité du foyer n'ont que peu d'influence sur la température d'une masse d'eau aussi considérable. Pour la même raison, cette masse d'eau peut abandonner des quantités de chaleur très grandes, sans éprouver un grand abaissement de température. — Aussi, ces appareils offrent-ils l'avantage d'entretenir une température douce et constante. Mais les frais d'établissement en sont considérables, en raison de la résistance que doivent avoir leurs diverses parties, pour supporter les pressions qu'elles éprouvent de la part de la colonne d'eau qui les surmonte.

Pour le *chauffage par la vapeur d'eau*, on emploie des appareils dont la disposition générale est analogue à la précédente. Ils se composent : 1° d'une chaudière à vapeur; 2° de tuyaux qui conduisent la vapeur dans des poêles à condensation; 3° de tuyaux destinés à ramener à la chaudière l'eau de condensation. — L'efficacité de ce mode de chauffage résulte de la grande quantité de chaleur qu'abandonne la vapeur au moment de la liquéfaction (354).

II. — CHAUDIÈRES A VAPEUR.

360. Moteurs à vapeur, en général. — Un moteur à vapeur comprend, en général : d'une part, un *générateur* de vapeur, ou *chaudière;* d'autre part, une *machine* dans laquelle la tension de cette vapeur est utilisée, pour produire un mouvement qui est ensuite transmis à divers organes.

361. Chaudière à bouilleurs. — Une chaudière à bouilleurs se compose essentiellement d'un gros cylindre horizontal A (*fig.* 238 et 239), qui est le *corps* de la chaudière, et de deux cylindres plus petits N, N', qui sont les *bouilleurs;* la communication entre le corps et les bouilleurs est établie par une paire de tubulures C, D, ou *évents*. L'eau remplit les bouilleurs et une partie du corps de la chaudière. Le foyer O est placé au-dessous de l'une des extrémités de la chaudière. — Pour augmenter la surface de chauffe, on emploie généralement la disposition suivante. Une voûte horizontale, construite au niveau de l'axe des bouilleurs, partage tout le fourneau en deux étages (*fig.* 239), et l'étage supérieur est lui-même divisé en deux galeries, par une cloison verticale qui n'est interrompue qu'à son extrémité la plus voisine

du foyer. La flamme et les gaz chauds qui viennent du foyer, après avoir parcouru toute la longueur du fourneau d'avant en arrière,

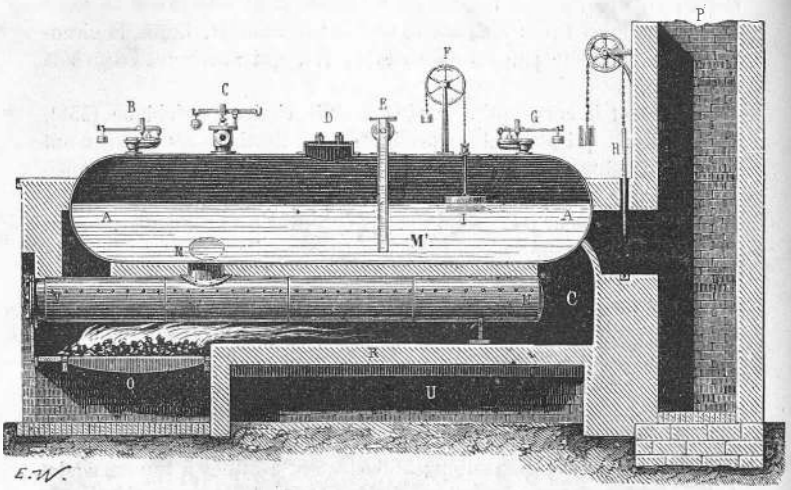


Fig. 238. — Chaudière à bouilleurs.

dans l'étage inférieur (*premier carneau*), reviennent d'arrière en avant par l'un des compartiments ménagés dans l'étage supérieur (*deuxième carneau*); enfin ils retournent par l'autre compartiment (*troisième carneau*) vers la cheminée P. C'est l'ensemble de toutes ces parties qui constitue la *surface de chauffe*.

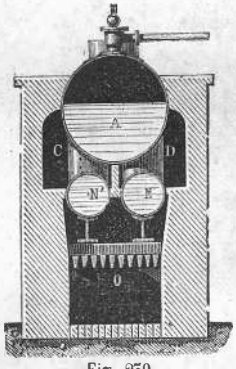


Fig. 259.

362. Appareils indicateurs du niveau de l'eau. — Il est indispensable que le niveau de l'eau dans la chaudière ne s'abaisse jamais de manière à laisser à découvert une portion de paroi directement chauffée. En effet, une portion de paroi qui serait en contact avec la flamme par sa surface extérieure, et qui ne serait pas en contact avec l'eau par sa surface intérieure, arriverait rapidement à l'incandescence; quand on viendrait à introduire dans la chaudière une nouvelle quantité d'eau, il y aurait production brusque d'une énorme quantité de vapeur, et danger d'explosion. — Le chauffeur doit donc avoir des moyens de vérifier, à chaque instant, la position du niveau de l'eau dans la chaudière.

L'un des moyens les plus simples consiste dans l'emploi d'un tube

de cristal, dont les extrémités communiquent, l'une avec la partie inférieure du corps de la chaudière, l'autre avec sa partie supérieure. Le niveau de l'eau, dans ce tube, est toujours sur le même plan horizontal que dans la chaudière elle-même.

On emploie également un flotteur I (*fig.* 238), fixé à l'extrémité d'une chaîne qui passe sur une poulie extérieure F, et se termine par un contrepoids : l'axe de la poulie porte une aiguille, dont la position indique le niveau de l'eau à l'intérieur.

Enfin, le *sifflet d'alarme* (*fig.* 240) est destiné à avertir le chauffeur, alors même qu'il serait inattentif, de l'abaissement du niveau de l'eau dans la chaudière. — Tant que le niveau de l'eau est suffisamment haut, le flotteur A éprouve une poussée qui, par l'intermédiaire du levier ABC, applique le bouchon *a* sur l'extrémité du conduit *b*. Mais si le niveau de l'eau vient à descendre plus qu'il ne doit le faire, le flotteur A s'abaisse, et entraîne la branche BA du levier; le bouchon *a* démasquant alors l'ouverture du conduit, il se produit un jet de vapeur qui vient se briser sur les bords du timbre *d* et le fait résonner tant qu'on n'a pas ramené dans la chaudière une nouvelle quantité d'eau (*).

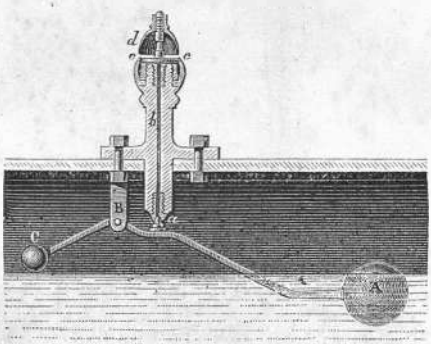


Fig. 240. — Sifflet d'alarme.

363. Alimentation des chaudières. — L'alimentation de la chaudière, c'est-à-dire l'introduction de la quantité d'eau nécessaire pour remplacer progressivement celle qui se convertit en vapeur, doit toujours se faire par le fond de la chaudière : si cette eau plus froide était introduite par la partie supérieure, elle déterminerait une condensation de la vapeur, et, par suite, une perturbation dans la marche de la machine. — Pour la faire pénétrer dans la chaudière on a d'abord employé une pompe foulante, dite *pompe d'alimentation*, mise en jeu par la machine elle-même. Mais le fonctionnement de cette pompe exige une dépense de force assez grande : on la remplace généralement aujourd'hui par l'*injecteur Giffard*.

364. — Injecteur Giffard. — Cet appareil extrêmement ingénieux, dont

(*) Dans les locomotives, le chauffeur peut aussi faire résonner le sifflet, en y amenant la vapeur au moyen d'un robinet placé à sa portée, de manière à produire des signaux d'avertissement, réglementés par la police des chemins de fer.

la figure 241 représente la coupe, est adapté au tube même qui sert au dégagement de la vapeur de la chaudière. Quand son robinet E est ouvert, une certaine quantité de vapeur pénètre par de petites ouvertures *d*, *d*, et vient former un jet animé d'une grande vitesse, par l'ouverture d'une tuyère F, placée dans le tube convergent *aa;* une tige *e*, terminée en pointe, qu'on appelle l'*aiguille*, et qu'on peut faire pénétrer plus ou moins dans la tuyère à l'aide d'une vis commandée par la manivelle extérieure *u*, permet de rétrécir plus ou moins le passage offert à l'arrivée de la vapeur. L'orifice d'échappement F correspond à la partie supérieure d'un tuyau H, dont l'extrémité infé-

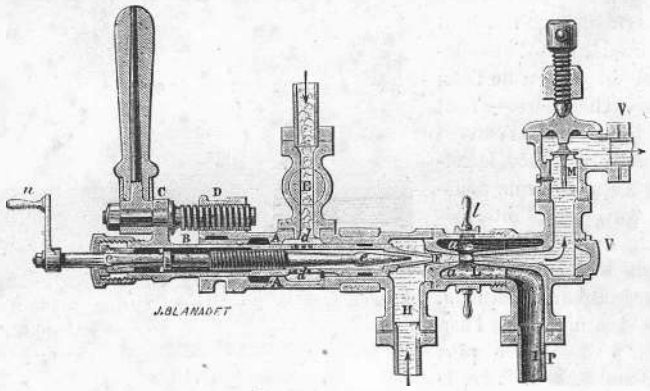


Fig. 241. — Injecteur Giffard.

rieure plonge dans un réservoir à eau : la condensation partielle de la vapeur détermine l'ascension de l'eau dans ce tube, et cette eau, entraînée par le mouvement du jet, pénètre d'abord dans le tube convergent *aa*, puis dans le *tube divergent* qui est situé en face, à une petite distance : l'eau acquiert dans ce dernier tube une vitesse progressivement décroissante, et arrive au fond de la chaudière par le conduit VV. Un clapet M, situé sur le trajet de ce conduit, empêche l'eau de la chaudière de revenir à l'injecteur, si la pression dans l'injecteur venait à diminuer. — Enfin l'espace élargi L, qui environne l'extrémité du tube convergent et celle du tube divergent, sert à recueillir l'air qui se dégage de l'eau arrivant du réservoir, et l'excès d'eau qui n'est point entraîné dans le tube divergent ; ce mélange d'air et d'eau s'écoule à l'extérieur par le tuyau P.

L'avantage de l'injecteur Giffard est de produire un appel d'eau continu, tant que la vapeur pénètre dans la tuyère : on le règle, en faisant pénétrer plus ou moins l'aiguille à l'aide de la manivelle *u*. — L'appareil occupe d'ailleurs très peu de place : il n'a guère qu'une longueur de 20 centimètres.

365. Soupapes de sûreté. — Manomètres. — Les *soupapes de sûreté*, destinées à donner issue à la vapeur lorsque sa tension devient supérieure à celle que la chaudière peut supporter, sont semblables à celle de la marmite de Papin (*fig.* 207). Les règlements exigent que chaque chaudière soit munie de deux soupapes au moins : chacune d'elles doit

avoir une section suffisante pour que, une fois ouverte, *à elle seule* et quelle que soit l'activité du feu, elle maintienne la tension de la vapeur

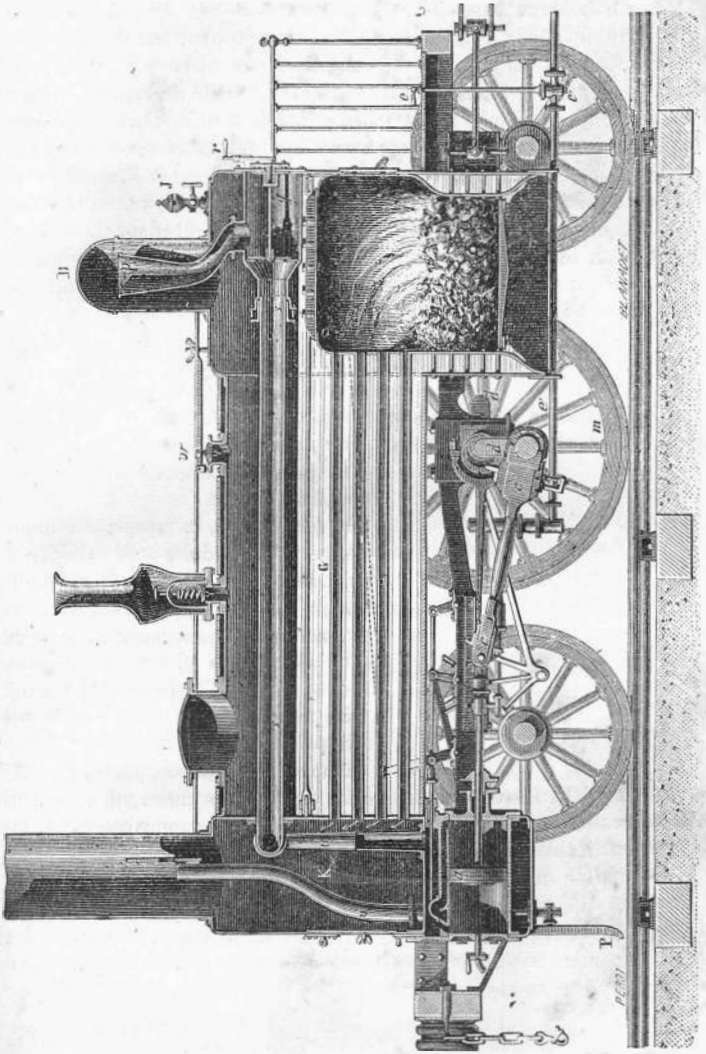


Fig. 242. — Coupe longitudinale d'une locomotive du système Stephenson.

au-dessous de la limite déterminée par la résistance de la chaudière. La figure 238 montre deux de ces soupapes, B, C.

Nous avons décrit précédemment les *manomètres* destinés à évaluer la pression de la vapeur (140 à 143) : les manomètres métalliques (143) sont aujourd'hui presque les seuls employés.

366. Chaudières tubulaires. — L'invention des chaudières tubulaires est due à Marc Séguin, en 1826; elle a eu pour but d'augmenter considérablement la surface de chauffe, de manière à permettre de produire en peu de temps une très grande quantité de vapeur.

La figure 242 représente la section longitudinale d'une chaudière tubulaire, telle qu'elle a été appliquée aux locomotives, en 1829, par Robert Stephenson. — Le foyer est placé à l'arrière; la flamme passe par 120 à 150 tuyaux, disposés dans la longueur du *corps* G de la chaudière, et environnés par l'eau. Les gaz se rendent dans la *boîte à fumée* K, où se dégage, par la tuyère U, la vapeur qui a servi à produire le mouvement de la machine. — Cet échappement de vapeur contribue puissamment à activer le tirage.

III. — MACHINES A VAPEUR.

367. Organes d'une machine à vapeur, en général. — Nous indiquerons les organes essentiels d'une machine à vapeur, en prenant pour type la machine de Watt, ou *machine à balancier.*

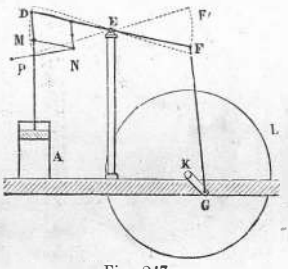


Fig. 243.

Du générateur, la vapeur est amenée, par un conduit, à un cylindre A (*fig.* 243), dans lequel peut se mouvoir un piston. Supposons que la vapeur arrive *alternativement* en dessous et en dessus du piston ; supposons, en outre, que, à l'instant où la vapeur arrive au-dessous du piston, celle qui était primitivement au-dessus puisse s'échapper dans l'atmosphère, et réciproquement. La force élastique de la vapeur imprimera au piston un mouvement de va-et-vient : il reste à transformer ce mouvement en un *mouvement de rotation continu.* — Dans la machine à balancier, cette transformation de mouvements s'effectue de la manière suivante :

La tige qui est fixée au piston, glissant à frottement doux dans une boîte à cuir placée dans la base supérieure du cylindre, vient se lier à l'extrémité d'un *balancier* DF, mobile autour de son milieu E (*). Le mouvement de va-et-vient du piston fait ainsi décrire au point F l'arc

(*) Cette liaison se fait par l'intermédiaire d'un parallélogramme de tiges métalliques, dit *parallélogramme articulé*, et destiné à éviter les flexions qu'éprouverait la tige, pendant les mouvements du balancier, si elle était articulée directement elle-même au point D. Les quatre sommets de ce parallélogramme sont articulés, de sorte que les angles peuvent varier sans que les longueurs des côtés varient : le sommet N

de cercle FF', alternativement dans un sens et dans l'autre : le point F est relié, par l'intermédiaire d'une *bielle* FG, à l'extrémité d'une *manivelle* KG, et la manivelle est ainsi animée d'un mouvement de rotation continu, autour de son axe K. Cet axe est celui de l'*arbre de couche*, sur lequel passent les courroies qui transmettent le mouvement à tous les organes de l'usine : il porte un *volant* L, c'est-à-dire une roue d'un rayon très grand et d'un poids considérable, qui sert à régulariser le mouvement (373).

368. Condenseur. — Nous avons supposé que, au moment où la vapeur arrive de la chaudière par le tube *t* dans la partie inférieure D du cylindre (fig. 244), la partie supérieure C laisse échapper dans l'atmosphère, par le tube *t'*, la vapeur qu'elle contenait, et réciproquement. — Or, supposons que la pression dans la chaudière soit, par exemple, de trois atmosphères : pendant que cette pression s'exerce sur la face inférieure du piston, la pression atmosphérique s'exerce sur la face supérieure, en sorte que le piston n'est sollicité que par une pression résultante, égale à deux atmosphères. — On peut supprimer presque entièrement cette perte de force, par l'emploi du condenseur, qui est dû à Watt.

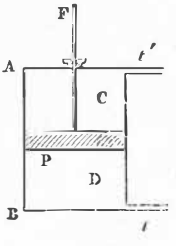


Fig. 244.

Le *condenseur* est une enceinte hermétiquement close, et vide d'air, dans laquelle pénètre, sous forme de pluie, un jet continu d'eau froide ; au moment où la vapeur de la chaudière arrive dans le cylindre, par le tube *t*, le tube *t'* est mis en communication avec le condenseur. Or, si la température dans le condenseur est, par exemple, de 45°, la tension de la vapeur d'eau y sera seulement d'un dixième d'atmosphère environ : dans ces conditions, la vapeur contenue dans l'espace C doit affluer dans le condenseur, et s'y liquéfier jusqu'à ce que la tension ne soit plus que d'un dixième d'atmosphère. — Le phénomène de l'abaissement de pression est d'ailleurs tellement instantané, qu'on peut considérer la pression résistante comme étant toujours égale à un dixième d'atmosphère, c'est-à-dire égale à *la tension correspondante à la température des parties les plus froides de l'espace qui contient la vapeur*. C'est le principe connu sous le nom de *principe de Watt*. — L'utilité du condenseur est donc manifeste (*).

est relié à un point fixe P par une tige rigide, mobile elle-même autour de P, de sorte que N est assujetti à décrire un arc de cercle dont le centre est en P ; ce mode de liaison, imaginé par Watt, a pour résultat, comme la théorie le démontre, de faire décrire sensiblement *une ligne droite* à l'extrémité M de la tige du piston, pendant que l'extrémité D du balancier décrit un arc de cercle.

(*) On reconnaît immédiatement une machine *sans condenseur*, à ce qu'on voit la vapeur s'échapper dans l'atmosphère, et former une sorte de panache blanc, qui apparaît par saccades, à chaque coup de piston. — Il ne se produit rien de semblable dans une machine à *condenseur*.

369. Détente. — Lorsque le cylindre reste en communication avec la chaudière pendant toute la course du piston, la vapeur agit sur le piston, pendant tout ce temps, avec une tension constante, et s'échappe ensuite dans l'atmosphère. — Watt a eu l'idée d'intercepter l'arrivée de la vapeur *avant la fin de la course* du piston : la continuation de la course du piston produit alors, sur la vapeur enfermée dans le cylindre, un accroissement de volume, et par suite une diminution de force élastique, ou une *détente;* mais, pourvu que l'accroissement de volume ne soit pas trop considérable, la vapeur conserve encore une force élastique supérieure à la pression qui s'exerce sur l'autre face du piston.

Il est facile de montrer, par un raisonnement simple, qu'on trouve dans l'emploi de la *détente* une économie réelle. — Supposons que la force élastique de la vapeur dans la chaudière soit de 2 atmosphères, et qu'à chaque coup de piston on laisse la vapeur arriver dans le cylindre pendant *la première moitié* seulement de la course du piston. On dépensera, pour un même nombre de coups de piston, *moitié moins de vapeur;* d'autre part, il est facile de voir que l'*effet sur le piston ne sera pas réduit de moitié.* En effet, la force motrice de 2 atmosphères agira toujours pendant les premières moitiés des courses du piston, ce qui constitue déjà la moitié de l'effet qui se serait produit sans l'emploi de la détente; mais, en outre, pendant les secondes moitiés des courses, le piston sera encore soumis à l'action d'une force motrice variant entre 2 atmosphères et 1 atmosphère, force toujours supérieure à la force résistante qui agit sur l'autre face. — Donc, *pour une même dépense de vapeur,* il y aura *augmentation de l'effet produit.*

L'immense majorité des machines fonctionne aujourd'hui avec détente. — On emploie fréquemment les *degrés de détente* $\frac{1}{3}$. $\frac{1}{10}$, c'est-à-dire qu'on laisse arriver la vapeur pendant le cinquième, le dixième de chaque course de piston. Enfin, avec des machines présentant une grande perfection, on a pu employer la détente à $\frac{1}{25}$ et même à $\frac{1}{30}$.

370. Distribution de la vapeur. — Tiroir. — Pour que les mouvements d'allée et de venue du piston puissent se produire, il faut que la vapeur vienne presser sur le piston tantôt d'un côté, tantôt de l'autre. — Voici comment on réalise ces conditions à l'aide du *tiroir :*

La vapeur arrive de la chaudière par le tube F, dans la *boîte à vapeur* FG (*fig.* 245), fixée sur le côté du cylindre : à l'intérieur de cette boîte se trouvent les ouvertures *a*, *b*, de deux conduits *a*A, *b*B, qui viennent aboutir chacun à l'une des extrémités du cylindre. Dans l'intervalle, se trouve l'ouverture K d'un autre conduit qui va déboucher dans l'atmosphère ou dans le condenseur. Enfin une pièce mobile *mn*, à laquelle sa forme a fait donner le nom de *tiroir*, vient s'appliquer sur ces ouvertures, mais elle n'a que la longueur nécessaire pour couvrir deux d'entre elles. — Quand le piston arrive au haut de sa course, le

tiroir se place dans la position indiquée par la figure 245; la vapeur qui vient de la chaudière pénètre par *a*A dans la partie supérieure du cylindre : d'autre part, la vapeur qui se trouvait au-dessous du piston s'échappe par le conduit B*b* et par le conduit K, dans l'atmosphère ou dans le condenseur. Le piston se met donc en mouvement de haut en bas. — Quand le piston arrive au bas de sa course, la tige E amène le tiroir dans la position indiquée par la figure 246 : la vapeur pénètre, par *b*B, dans la partie inférieure du cylindre ; la vapeur qui se trouvait au-dessus du piston peut s'échapper par le conduit A*a* et par le conduit K dans l'atmosphère ou dans le condenseur. Le piston se met donc en mouvement de bas en haut, et ainsi de suite.

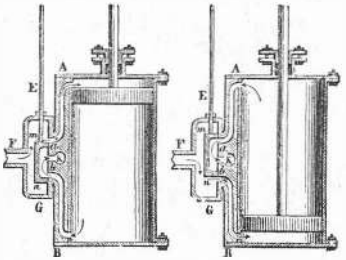


Fig. 245. Fig. 246.

Pour que la machine marche avec détente, il suffit de régler la marche ou les dimensions du tiroir, de manière que l'arrivée de la vapeur dans le cylindre soit interceptée, pendant la course du piston, avant que la communication de l'autre partie du cylindre avec le condenseur soit interrompue (*).

371. Machines à basse pression, à moyenne pression, et à haute pression. — Au point de vue de la valeur de la tension que possède la vapeur en arrivant de la chaudière, on distingue les machines en trois groupes :

1° Les machines à *basse pression*, dans lesquelles la tension de la vapeur ne dépasse guère une atmosphère et demie. — L'emploi du condenseur est particulièrement nécessaire dans ces machines, afin que la vapeur conserve une action suffisante sur le piston.

2° Les machines à *moyenne pression*, dans lesquelles la tension est de 3 à 5 atmosphères.

3° Les machines à *haute pression*, où la tension de la vapeur dépasse 5 atmosphères. — Dans les machines à haute pression, il y a avantage

(*) Dans les machines puissantes, quand on veut employer les degrés de détente $\frac{4}{25}$ ou $\frac{4}{30}$, on substitue au tiroir un autre mode de distribution de la vapeur.

Quatre orifices sont ménagés dans la paroi du cylindre : deux, A et B, à la partie supérieure; les deux autres, A' et B', à la partie inférieure. Les ouvertures A et A' servent à l'entrée de la vapeur, qui vient de la chaudière; par les ouvertures B et B', la vapeur se rend du cylindre dans l'atmosphère. Ces quatre orifices sont, au moment voulu, couverts ou découverts, par quatre pièces mobiles mues par des cames, et dont la forme est variable d'un type de machine à l'autre. Par exemple, dans les machines du type Sülzer, ce sont des soupapes à tige, qu'une roue à cames soulève brusquement, et qu'un puissant ressort fait refermer quand la came cesse d'agir.

à supprimer le condenseur : on perd une atmosphère comme force motrice, mais on évite la dépense de travail nécessaire pour renouveler incessamment l'eau du condenseur.

372. Puissance d'une machine. — Cheval-vapeur. — Watt. — On exprime généralement la puissance des machines, en indiquant leur *force en chevaux*. C'est là une expression toute conventionnelle, dont il faut connaître la signification.

On dit qu'une machine vaut un *cheval-vapeur*, lorsqu'elle est capable d'effectuer un travail de 75 kilogrammètres par seconde, c'est-à-dire d'élever, par seconde, 75 kilogrammes à 1 mètre de hauteur. Une machine vaut 2, 3 chevaux, lorsqu'elle est capable d'effectuer, par seconde, un travail de 2, 3 fois 75 kilogrammètres (*).

L'unité absolue C.G.S. *de puissance* serait la puissance d'un moteur capable de produire un travail d'un erg en une seconde. Cette unité de puissance serait extrêmement petite. — On a pris pour *unité pratique* C.G.S, de puissance, celle d'un moteur capable de produire l'unité pratique de travail, un joule (36), en une seconde : cette unité a reçu le nom de *watt*. Le joule valant 10^7 ergs, le watt vaut 10^7 unités absolues de puissance.

Une machine dont la puissance est d'un cheval-vapeur, produit 75 kilogrammètres en une seconde; or on sait que le kilogrammètre équivaut à 98.100.000 ergs (35); le travail produit par la machine en une seconde est donc de $75 \times 98.100.000 = 7.360.000.000$ ergs. En d'autres termes, le nombre 7 milliards 360 millions exprimerait, en unités C.G.S absolues, la puissance d'une machine d'un cheval-vapeur. — Le watt, unité pratique C.G.S, valant 10^7 unités absolues, le cheval-vapeur vaut 736 watts.

373. Organes régulateurs du mouvement — Volant et régulateur à boules. — Le plus ordinairement, les résistances que doit vaincre une machine varient d'un instant à l'autre, et parfois d'une manière brusque : c'est ainsi, par exemple, qu'une machine employée à faire fonctionner les diverses machines-outils d'un atelier éprouve des résistances variables, selon qu'on met en communication avec l'arbre de couche un nombre plus ou moins grand de ces outils, ou que chacun d'eux est appliqué à des matériaux plus ou moins résistants. — Pour atténuer les variations brusques de vitesse que pourrait ainsi éprouver la machine, on adapte, sur l'arbre de couche, un *volant*, c'est-à-dire une grande roue de fonte L (*fig.* 243 et 248), ayant une masse M très considérable à sa circonférence. Si la résistance opposée à la machine vient à varier, la force vive du volant variera en sens inverse, d'une quantité égale à la variation du travail résistant (23); mais la variation

(*) La puissance d'une machine, en chevaux-vapeur, ne représente pas le nombre de chevaux qu'il faudrait employer pour remplacer la machine elle-même. — Pour faire fonctionner, d'une manière continue, une machine ayant une puissance de 10 chevaux-vapeur, il faudrait employer 55 chevaux ordinaires, de force moyenne, fonctionnant d'une manière alternative, avec les intervalles de repos qu'il est indispensable de leur laisser prendre.

de la vitesse sera d'autant plus petite que la masse M du volant sera plus considérable.

Cependant, si la machine continuait à n'éprouver, pendant un temps assez long, que des résistances assez faibles, son mouvement pourrait finir par devenir trop rapide : elle arriverait à *s'emporter*. Pour parer à cet inconvénient, on emploie le *régulateur à boules*, qui est représenté par la figure 247. — Il se compose d'un système de deux sphères pesantes P, P, fixées à deux tiges métalliques articulées en A à l'extrémité de la tige verticale B. Le mouvement de rotation de l'arbre de la machine est transmis, par l'intermédiaire d'une courroie sans fin *tt* (*fig.* 248) et des roues d'angles T, à la tige B (*fig.* 247), en sorte que, pendant le mouvement, les boules tendent à s'écarter de cette tige, d'autant plus que la vitesse de rotation est plus grande : elles soulèvent alors, par l'intermédiaire des tiges articulées AD, DC, une bague CC qui glisse librement le long de B; l'extrémité G du levier coudé EFG tire alors horizontalement la tige GH, laquelle agit à son tour comme le montre la figure 248, et tend à fermer une valve *a* placée sur le tuyau d'arrivée de la vapeur dans le cylindre. Le mouvement de la machine tend alors à se ralentir de lui-même. — Au contraire, si le mouvement de la machine devient trop lent, le poids des boules les rapproche de la tige B, et la bague CC redescend; la valve *a* s'ouvrant davantage, l'arrivée de vapeur augmente, et le mouvement recommence à s'accélérer.

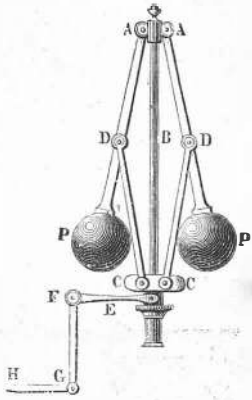


Fig. 247.
Régulateur à boules.

374 Pompes adjointes à la machine. — Dans la machine de Watt, on trouve un système de trois pompes destinées à entretenir une sorte de circulation de l'eau, indispensable à la marche régulière de la machine. Ce système de pompes doit : 1° amener continuellement une pluie d'eau froide dans la chambre à condensation (*pompe à eau froide*); 2° enlever de cette chambre l'eau qui s'y est échauffée par la condensation de la vapeur, et l'air que la diminution de la pression a dégagé de l'eau (*pompe à air*); 3° prendre une partie de cette eau pour alimenter la chaudière à vapeur (*pompe d'alimentation*). — Ces trois pompes ont leurs tiges reliées au balancier, en sorte qu'elles sont mises en mouvement par la machine elle-même : la figure 248 représente la coupe des diverses capacités dans lesquelles elles mettent l'eau en mouvement.

La *pompe à eau froide q* (*fig.* 248) puise l'eau dans un puits ou dans

un cours d'eau, et la verse en r dans un vaste réservoir RR, qui doit être toujours plein d'eau. Cette eau, environnant le condenseur e, con-

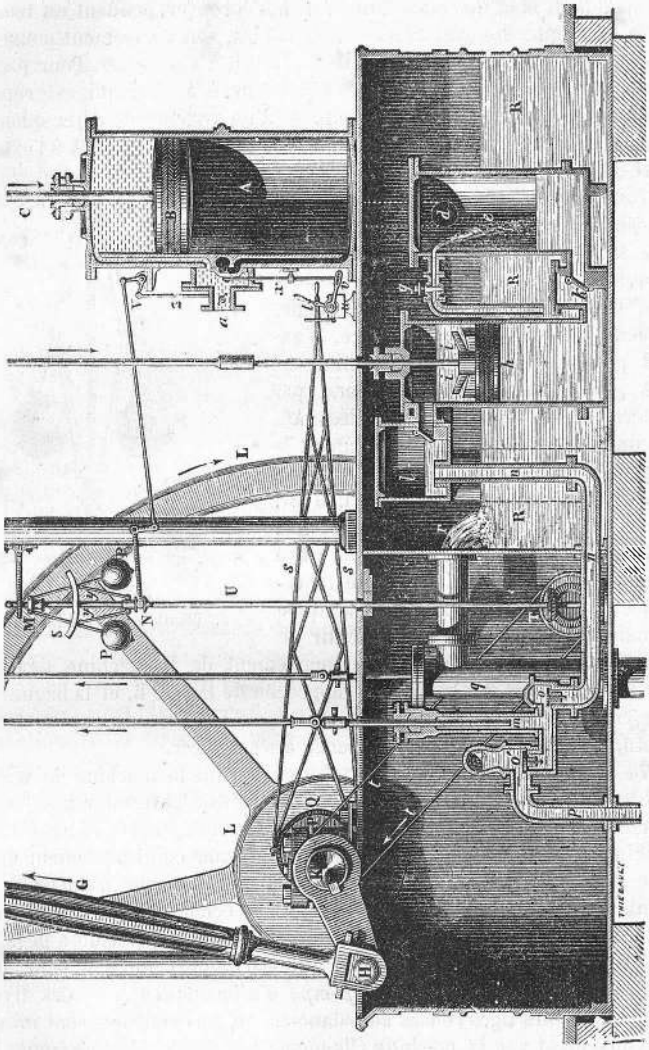


Fig. 248. — Machine de Watt.

tribue à le refroidir. En raison de la raréfaction produite dans le condenseur, par la condensation même, l'eau froide y arrive d'une manière continue par le robinet g.

La *pompe à air h* aspire l'eau chaude du condenseur, et l'air que cette eau a dégagé : l'eau aspirée franchit les soupapes *i*, *i* du piston, et est déversée dans un petit réservoir *l*.

La *pompe d'alimentation m* aspire une partie de cette eau chaude, par le conduit *nn* et la soupape *o;* elle la refoule ensuite, par la soupape *o'* et le conduit *p*, jusque dans la chaudière, où elle sert à remplacer l'eau qui s'est convertie en vapeur (*).

375. Mouvement du tiroir. — Excentrique circulaire. — Voici comment se produisent les déplacements du tiroir (370).

La tige *x*, qui porte le tiroir (*fig.* 248), est articulée avec l'un des bras d'un petit levier coudé *vut*, dont l'autre bras s'articule en *t* avec le système de tiges *ss;* ce système se termine par un collier Q, qui presse légèrement sur le contour d'un disque circulaire P, fixé sur l'arbre de couche K. Mais le centre du disque P n'est pas sur l'axe de l'arbre de couche : il est, comme le montre la figure, en dehors de l'axe, et du côté opposé à la manivelle; de là, le nom d'*excentrique circulaire* donné à la pièce P. Dès lors, pendant chaque rotation de l'arbre de couche, le collier entraîne les tiges *ss* et le point *t* successivement vers la droite et vers la gauche; ces mouvements, se transmettant à la tige *x* par le levier coudé *tuv*, ont pour effet de faire successivement descendre et monter le tiroir. — Comme à chaque tour complet de l'arbre K correspond une allée et venue du piston, on voit que les rapports de position du piston et du tiroir, une fois établis convenablement, se conservent indéfiniment.

376. Divers types de machines. — Nous avons pris comme exemple la machine de Watt, dans laquelle la transmission du mouvement du piston à l'arbre de couche se fait par l'intermédiaire d'un *balancier*, d'une *bielle* et d'une *manivelle* (*fig.* 245).

Cette machine, dont la figure 248 représente tous les organes, sauf le balancier, est construite pour fonctionner *à basse pression :* elle est remarquable par la régularité de sa marche (**). — Mais les machines de ce type sont encombrantes, coûteuses, et consomment, à force égale, beaucoup plus de charbon que des machines plus simples.

(*) On remplace le plus souvent aujourd'hui la pompe d'alimentation par l'*injecteur Giffard*, qui a été décrit plus haut (564).

(**) Les *machines Compound*, ou machines de Wolf, présentent une régularité plus grande encore. — Deux cylindres, de diamètres très inégaux, sont placés l'un à côté de l'autre; les tiges des deux pistons sont articulées avec une même extrémité du balancier, de manière qu'elles montent ou descendent simultanément. Le petit cylindre est le seul qui reçoive la vapeur de la chaudière : quand la vapeur a agi sur une face du petit piston, elle est amenée, par un conduit, à la face opposée du piston de l'autre cylindre, et pénètre progressivement dans ce cylindre pendant le mouvement de son piston; elle agit donc sur le gros piston par une véritable détente, dont le travail s'ajoute à celui qu'elle avait déjà produit sur le petit piston. La vapeur retourne ensuite au condenseur. — Ces machines sont celles qui exigent le plus de précision dans l'ajustement; ce sont aussi les plus coûteuses. Mais la régularité de leur marche se prête aux opérations industrielles les plus délicates.

On verra, dans la Théorie mécanique de la chaleur (395), qu'il y a avantage, au point de vue économique, à employer des machines fonctionnant à haute température, et, par conséquent, à *haute pression*.

En outre, la tendance actuelle de l'industrie est de diminuer le nombre des organes des machines, de manière à en rendre la construction moins délicate et l'installation moins encombrante. — C'est ainsi que l'on construit aujourd'hui un grand nombre de *machines à action directe*, dans lesquelles, en supprimant le balancier, on articule directement la tige du piston avec la bielle, et quelquefois même avec la manivelle qui imprime la rotation à l'arbre de couche.

377. Locomobiles. — Comme exemple de machines particulièrement simples, on peut citer les *locomobiles*, qui sont des machines offrant

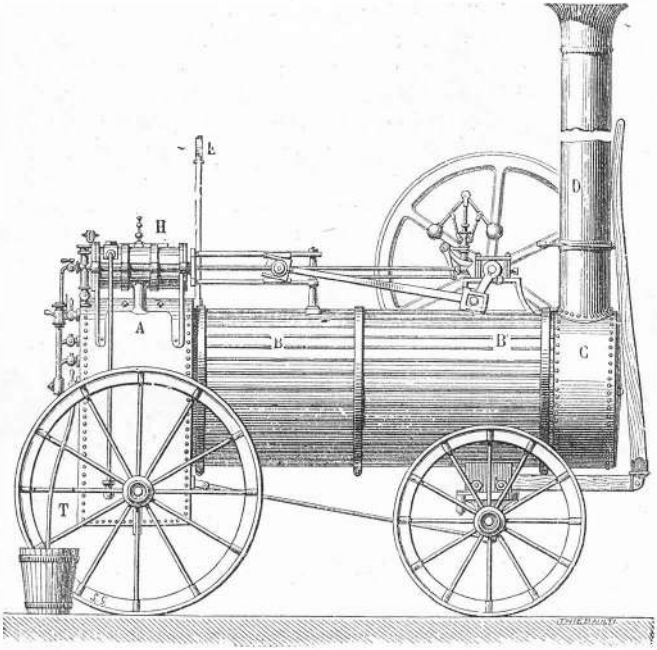


Fig. 249. — Locomobile.

l'avantage de pouvoir être transportées sur le lieu même où elles doivent effectuer temporairement un certain travail. — Deux paires de roues portent à la fois la chaudière, avec son foyer et sa cheminée, et la machine avec son volant (*fig.* 249).

La chaudière est une chaudière tubulaire, comme celles des locomo-

tives (366), avec cette différence que les tubes sont plus gros, plus courts, et moins nombreux : le foyer A est placé à l'arrière, la cheminée B à l'avant, en sorte que l'ensemble offre une ressemblance grossière avec une locomotive.

La machine, dont le cylindre H est horizontal, est une machine *à action directe* (la tige du piston s'articule directement avec la bielle), fonctionnant *à haute pression*, et *sans condenseur*.

378. Locomotives. — Dans les *locomotives*, l'action de la vapeur est employée à faire tourner une ou plusieurs paires de roues, qui contribuent à porter le châssis sur lequel est installée la machine. C'est l'adhérence de ces roues pour les rails qui détermine le mouvement de tout le système : on leur donne le nom de *roues motrices* pour les distinguer des autres, qui sont les *roues porteuses*. — Le système dont la coupe a été représentée plus haut (*fig.* 242) est celui de la locomotive Stephenson, dans lequel l'action motrice de la machine s'exerce sur une seule paire de roues, la paire du milieu.

La figure 242 montre comment s'effectue la *prise de vapeur :* la vapeur formée dans la chaudière se rend dans le *dôme à vapeur* D, et pénètre dans un tuyau *p* qui la conduit, par la série de tubes *ssu*, aux cylindres dont elle doit faire mouvoir les pistons. On voit que ces conduits sont environnés, pendant tout le trajet *pss*, par la vapeur qui se dégage de la chaudière : cette disposition a pour objet d'empêcher que la vapeur contenue dans les conduits soit mélangée de gouttelettes liquides entraînées. — L'admission de la vapeur du dôme dans le tuyau *ss* se fait par une sorte de clef, qui est disposée à l'extrémité de la tige *g*, et que le chauffeur manœuvre au moyen de la manette *r*.

La vapeur agit sur un système de deux pistons placés à l'avant de la machine, l'un à droite, l'autre à gauche : ce sont comme deux machines dont les actions concordent pour faire tourner l'essieu, *auquel sont invariablement fixées les roues motrices*. La figure 242 montre, en *a*, l'un de ces deux pistons : la tige, guidée entre des glissières, s'articule avec la bielle *cc*, qui vient elle-même s'articuler avec une sorte de manivelle *d*, formée par une partie coudée de l'essieu.

Nous n'avons décrit ici que les pièces essentielles d'une locomotive, celles qui permettent de comprendre comment se produit le mouvement. Les locomotives présentent d'autres pièces qui permettent de satisfaire à toutes les exigences de l'arrêt ou de la marche. — Elles présentent en outre des différences de construction, suivant qu'elles doivent être employées pour la marche à grande vitesse, ou pour remorquer un grand nombre de wagons.

379. Machines à gaz. — On désigne sous le nom de *machines à gaz*, des machines où le mouvement est produit par la combustion d'un mélange gazeux, combustion s'effectuant dans le cylindre lui-même. — Le seul mélange qui ait été vraiment utilisé jusqu'ici est le mélange de

gaz d'éclairage et d'air. On fait en sorte que l'air soit toujours en excès, le gaz d'éclairage n'entrant dans le mélange que pour 7 centièmes environ : on obtient alors, non pas une explosion violente, mais une combustion qui s'effectue, pour ainsi dire, par couches successives.

Le piston aspire lui-même dans le cylindre, une fois la machine lancée, le gaz combustible et l'air extérieur; quand le piston arrive en un point déterminé de sa course, le tiroir, qui avait permis l'admission du mélange gazeux, ferme la lumière : c'est alors qu'on produit l'inflammation, qui donne naissance à une pression de 5 ou 6 atmosphères.

Quant à la manière de produire l'inflammation du mélange gazeux au moment précis où elle doit avoir lieu, elle diffère d'une machine à l'autre. — Dans la *machine Lenoir*, une étincelle électrique, produite par une petite bobine de Ruhmkorff (livre V), jaillit dans l'intérieur du cylindre. — Dans la *machine Hugon*, l'inflammation est produite par deux petits becs de gaz, installés dans des cavités ménagées dans le tiroir. Chacun de ces becs, en pénétrant dans la boîte, allume le mélange et s'éteint lui-même par l'explosion; il sort alors de la boîte, et vient se rallumer à un bec fixe, placé à l'extérieur : il rentre ensuite dans la boîte, au moment où il doit allumer de nouveau le mélange, et ainsi de suite (*).

En raison du prix, relativement élevé, du gaz d'éclairage, les machines à gaz sont moins économiques que les machines à vapeur, lorsqu'il s'agit d'un travail qui doit se continuer longtemps d'une manière régulière. — Elles sont précieuses surtout pour les travaux intermittents, puisqu'il suffit de quelques minutes pour les mettre en mouvement, et qu'on n'a pas à supporter de dépense de combustible dans les intervalles de repos de la machine.

(*) Dans les machines à gaz en général, la combustion, qui s'effectue dans le cylindre lui-même, donne lieu à un dégagement de chaleur considérable : aussi est-il nécessaire, pour éviter une trop grande élévation de température qui rendrait le graissage défectueux et détruirait les joints, de faire circuler constamment un courant d'eau froide autour du cylindre, dans une double enveloppe.

CHAPITRE XI

NOTIONS SUR LA THÉORIE MÉCANIQUE DE LA CHALEUR

I. — ÉQUIVALENCE ENTRE LE TRAVAIL MÉCANIQUE ET LA CHALEUR.

380. Apparition de chaleur, accompagnant la disparition d'une force vive de translation. — Pour faire concevoir le lien qui existe entre les phénomènes du mouvement et les phénomènes de la chaleur, prenons d'abord un exemple particulièrement simple, celui d'un corps pesant, de masse m, tombant d'une hauteur h et venant rencontrer un plan horizontal, *parfaitement rigide*, comme un plan de marbre.

Si l'on choisit d'abord, pour cette expérience, un corps *parfaitement élastique*, comme une bille d'ivoire, on le voit, après qu'il a touché le sol, remonter suivant la verticale, à la hauteur h dont il était tombé, c'est-à-dire revenir à son point de départ, avec une vitesse nulle (32). Or, dans le mouvement de descente, le corps *reçoit un travail mgh*, celui de son poids; en même temps, il *apparaît* dans le corps une *force vive* égale $\frac{1}{2} mv^2$, en désignant par v la vitesse dont il est animé à l'instant où il touche le plan de marbre. — Dans le mouvement d'ascension, la *force vive* $\frac{1}{2} mv^2$, que possédait le corps à l'origine de l'ascension, *disparaît*, mais le corps *produit un travail égal mgh*, en se déplaçant de bas en haut malgré son poids.

Si maintenant on répète la même expérience avec un corps *mou*, c'est-à-dire avec un corps qui, au lieu de rebondir comme la bille d'ivoire, reste appliqué sur le plan, il semble, au premier abord, qu'il y ait annulation de la force vive acquise pendant la chute, sans qu'il y ait production d'un travail correspondant. — Mais, dans tous les cas de ce genre, outre la déformation permanente qu'éprouve le corps, il se produit un nouveau phénomène, en apparence très différent des phénomènes du mouvement : il y a *dégagement de chaleur*. — Ainsi, quand une balle de fusil rencontre la plaque d'une cible, elle ne prend, après le choc, qu'une vitesse insensible en sens contraire; mais il se produit un dégagement de chaleur qui la rend brûlante. — Les

boulets, quand ils sont tirés sur des plaques de blindage, éprouvent une élévation de température qui les porte à l'incandescence. — Dans l'exemple particulier que nous avions choisi, d'un corps perdant par le choc la force vive qui lui avait été communiquée par la simple action de son poids, le dégagement de chaleur n'est bien manifeste que pour des hauteurs de chute assez considérables : cependant il peut être constaté déjà pour des hauteurs de 3 à 4 mètres.

381. Notion générale de l'équivalence, entre une quantité de chaleur et une quantité de force vive ou de travail. — Les phénomènes du choc ne sont pas les seuls où l'on constate la *production* d'une certaine quantité de chaleur, accompagnant la *perte* d'une certaine quantité de force vive ou de travail.

Le *frottement* des corps les uns contre les autres, en diminuant à chaque instant la vitesse dont ils étaient animés, développe de la chaleur. — Ainsi, le frottement du moyeu d'une roue contre l'essieu, quand l'essieu n'est pas suffisamment enduit de matière grasse, arrive à rendre la roue brûlante, et peut même parfois y mettre le feu. — C'est par le frottement que nous amenons l'extrémité d'une allumette chimique à la température de combustion du phosphore.

A ces observations vulgaires il convient d'ajouter la belle expérience exécutée à Munich en 1798 par Rumford. Il fit construire un appareil dans lequel un cône d'acier trempé, mis en mouvement autour de son axe par deux chevaux, venait frotter contre les parois d'une cavité pratiquée dans une pièce de fer ; le tout était plongé dans une caisse de sapin, contenant environ 10 litres d'eau froide. Au bout de deux heures et demie, l'eau était en pleine ébullition (*).

On imite cette expérience, dans les cours, au moyen d'une disposition due à Tyndall. — Un tube métallique, rempli d'éther, T (*fig.* 250), est disposé de manière qu'on puisse lui imprimer un mouvement de rotation rapide autour de son axe, à l'aide de la roue R et de la courroie sans fin CC. Pendant ce mouvement, on serre fortement le tube entre deux plaques de bois P, P'. La chaleur dégagée par le frottement amène bientôt l'éther à une température telle, que le bouchon B est chassé par la force élastique de la vapeur.

La *compression* des gaz donne lieu à un dégagement de chaleur, que l'on utilise dans le briquet à air (*fig.* 17) ; dans ce cas, le dégagement de chaleur correspond au travail reçu par le gaz, quand on met le piston en mouvement.

Inversement, dans la machine à vapeur il y a *dépense* d'une certaine quantité de chaleur fournie par le combustible, et *production* d'une

(*) Rumford tira de cette expérience la conclusion, bien digne de remarque, si l'on se reporte à l'époque où elle fut formulée, que le dégagement de chaleur ne devait être qu'un phénomène *de mouvement* ; c'est la conclusion à laquelle sont arrivés également les savants modernes, comme nous le verrons plus loin.

certaine quantité de force vive communiquée aux organes de la machine, ou d'un travail effectué par ces organes,

En présence de ces résultats, on a dû se demander si, dans tous ces

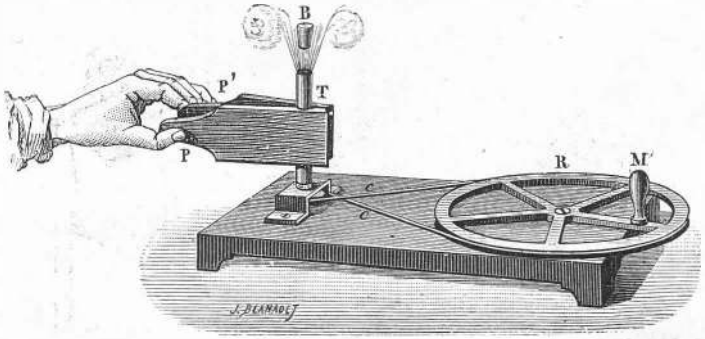


Fig. 250. — Expérience de Tyndall.

phénomènes divers, il n'existe pas un rapport constant entre la *quantité de chaleur* produite ou dépensée, et la *quantité de force vive ou de travail* dépensée ou produite. S'il en est ainsi, on en devra conclure qu'il y a *équivalence* entre une quantité déterminée de chaleur et une quantité déterminée d'énergie. — Nous allons indiquer quelques-unes des expériences qui ont permis d'arriver à ce résultat.

382. Transformation de travail en chaleur. — Expériences de Joule sur le frottement. — On doit à Joule, un grand nombre d'expériences, dans lesquelles on a employé une quantité déterminée de travail, pour produire, par le frottement de corps solides ou liquides les uns contre les autres, une quantité de chaleur que l'on mesurait avec précision.

Les parties principales de l'appareil sont les suivantes :

Deux masses de plomb M, M′ (*fig.* 251), de poids égaux P que nous supposerons d'abord évalués en kilogrammes-poids, suspendues à des cordons qui s'enroulent sur les axes B, B′ de deux poulies, sont abandonnées sous l'action de la pesanteur; elles impriment un mouvement de rotation à ces deux poulies, dont les gorges portent des fils qui viennent s'enrouler sur le cylindre de bois F et l'entraînent dans leur mouvement; sur l'axe vertical autour duquel tourne le cylindre, sont montées des palettes de laiton, qui se meuvent au milieu d'une masse d'eau contenue dans un calorimètre. — Le frottement de l'eau, contre les palettes et contre la paroi du calorimètre, a pour effet de rendre le mouvement uniforme, au bout de quelques instants. A partir de ce moment, au travail moteur des poids P ne correspond aucun accroissement de force vive, mais une élévation de température de l'eau et

des pièces solides du calorimètre, c'est-à-dire la production d'une certaine quantité de chaleur.

On déterminait, au moyen d'un thermomètre très sensible, l'éléva-

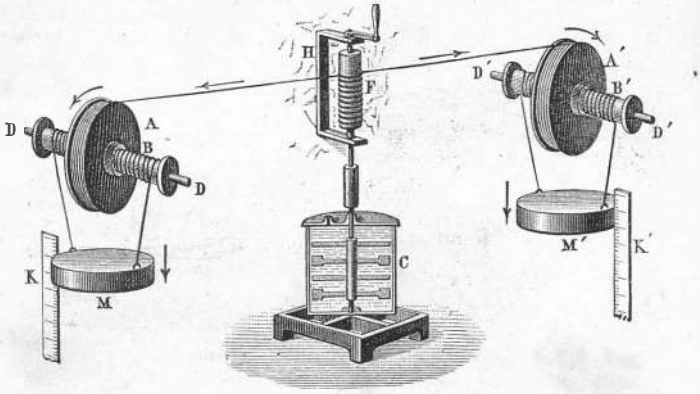


Fig. 251. — Expérience de Joule.

tion de température du calorimètre à la fin de l'expérience : on en déduisait, au moyen des chaleurs spécifiques connues, la quantité de chaleur produite Q, évaluée en grandes calories. — Le travail W, en kilogrammètres, qui avait été accompli pendant la chute des poids, était égal au produit de leur valeur 2P par la hauteur de chute H, évaluée en mètres.

La moyenne des expériences effectuées par Joule, en employant l'eau et le laiton, donna, pour le rapport $\frac{W}{Q}$, le nombre 424,9, ou sensiblement 425. — Joule fit d'ailleurs un grand nombre d'autres expériences, soit par la même méthode, en remplaçant l'eau par le mercure, et le laiton par le fer; soit par une méthode toute différente, en exerçant sur une masse d'eau une pression qui la forçait à traverser un diaphragme d'argile poreuse, et observant l'échauffement produit. Le nombre obtenu fut toujours sensiblement le même. — On peut donc affirmer que, dans les phénomènes de frottement, à la *production* d'une quantité de chaleur égale à une grande calorie, correspond la *dépense* d'une quantité de travail constante, et exprimée, en nombre rond, par 425 kilogrammètres.

Ce nombre 425 est ce que nous nommerons, dès maintenant, l'*équivalent mécanique de la chaleur*, ou ce qu'on pourrait appeler plus correctement l'*équivalent mécanique de la grande calorie*.

Remarque. La petite calorie équivaut alors à $0^{kgm},425$; et comme le kilogrammètre vaut 98 100 000 ergs, il en résulte que l'équivalent de la

petite calorie energs est $0{,}425 \times 98\,100\,000 = 4{,}17 \times 10^7$. En employant les unités pratiques C.G.S. l'équivalent de la petite calorie est donc de 4,17 joules.

383. Détails de l'expérience de Joule. — Pour obtenir un accroissement sensible de température, une seule expérience ne suffisait pas ; on renouvelait l'expérience jusqu'à vingt fois. A chaque fois, pour remonter les poids sans entraîner les palettes à l'intérieur du calorimètre, on commençait par immobiliser le treuil F, et on séparait son axe de celui des palettes; alors, au moyen de la manivelle, on remontait les poids, et on rétablissait la liaison entre les deux parties de l'axe, pour procéder à l'expérience suivante. Après vingt expériences, on divisait par 20 la quantité de chaleur produite, ce qui donnait la quantité de chaleur Q correspondante à une seule expérience.

Il faut remarquer, d'autre part, que le travail $2P \times H$ n'avait pas été employé tout entier à produire l'échauffement du calorimètre. En effet, chacun des poids P, au moment où il venait rencontrer le sol avec une certaine vitesse v, perdait par le choc la force vive qu'il possédait. On observait donc, au moyen d'une règle divisée, la vitesse v du mouvement sensiblement uniforme des poids, dans les instants qui précédaient le choc; en remarquant que la masse totale des deux poids moteurs est $\frac{2P}{g}$, on connaissait la force vive perdue par le choc, savoir $\frac{P}{g} v^2$. — Il fallait, en outre, retrancher de $2PH$ le travail w qui était employé à vaincre les frottements des pièces extérieures au calorimètre. Une dernière expérience faisait connaître cette quantité w : le treuil F étant détaché du calorimètre, on changeait le sens de l'enroulement du fil sur la poulie A'; la masse M' étant au bas de sa course, et la masse M au point K, on déterminait, par tâtonnements, quelle masse m il fallait ajouter du côté de M, pour que le poids additionnel p de cette masse communiquât au système la vitesse v observée dans les expériences principales : on avait évidemment $w = pH$. On avait donc, en définitive, une quantité de chaleur Q, équivalente au travail mécanique

$$W = 2PH - \frac{P}{g} v^2 - pH ;$$

C'est la valeur de W ainsi calculée qui donnait, pour le rapport $\frac{W}{Q}$, ou pour l'équivalent mécanique de la grande calorie, 425 kilogrammètres (*).

384. Transformation de chaleur en travail. — Expériences de Hirn sur la machine à vapeur. — Considérons une machine à vapeur, au moment où elle est arrivée à une période d'*activité régulière*, c'est-à-dire où la température T maintenue dans la chaudière par l'action du foyer

(*) Nous avons supposé P, p, v, g et H évalués avec le système des unités de la Mécanique, et Q en grandes calories.

Dans le système d'unités C.G.S., le travail W sera évalué en ergs, Q en petites calories, H en centimètres, et les masses M, m, seront évaluées en grammes. Remplaçons P et p par leurs valeurs Mg et mg ; l'équation précédente devient :

$$W = 2MgH - Mv^2 - mgH.$$

On en déduit alors $\frac{W}{Q} = 41\,700\,000$. L'équivalent mécanique de la petite calorie est donc 41 700 000 ergs, ou 4,17 joules.

demeure constante, et où il en est de même de la température t maintenue dans le condenseur par l'injection de l'eau froide.

Si l'on prend un intervalle de temps déterminé, cinq minutes, par exemple, on peut, connaissant la capacité du cylindre où la vapeur arrive librement, et le nombre de coups de piston pendant ce temps, calculer la masse de vapeur m qui a passé dans le cylindre : on en déduit la quantité de chaleur Q qui a été employée pour transformer la masse m d'eau à la température t du condenseur, en vapeur à la température T de la chaudière (353). — D'autre part, la mesure de la quantité d'eau froide qu'on doit injecter dans le condenseur pendant le même temps, pour y maintenir une température constante t, donne la quantité de chaleur Q′ qui est absorbée par cette eau (326), c'est-à-dire abandonnée par la vapeur qui s'y condense. — Or, on trouve que la quantité Q′ est toujours moindre que Q, c'est-à-dire que *la vapeur ne rapporte pas au condenseur toute la chaleur qu'elle avait prise à la chaudière* (*).

La perte de chaleur Q — Q′ correspond au travail produit par la vapeur sur le piston. — Pour mesurer ce travail, Hirn déterminait directement les valeurs successives de la pression exercée par la vapeur, en un certain nombre de points de la course du piston. Or, en considérant des points suffisamment voisins les uns des autres, on pouvait supposer que le piston passait, de chacun d'eux au suivant, sous l'action d'une force constante (égale à la différence des pressions exercées à ce moment sur ses deux faces) ; le *travail* correspondant à ce petit déplacement s'obtenait en multipliant cette force par le déplacement lui-même. Une série de termes semblables donnait le travail pendant la durée de la course entière, et par suite le *travail total* W pendant l'intervalle de temps que l'on avait choisi.

Les expériences de Hirn ont fourni, pour valeur moyenne du quotient $\frac{W}{Q - Q'}$, le nombre 413. L'accord de ce résultat avec ceux de Joule est plus grand qu'on n'aurait pu l'espérer, quand on songe aux difficultés de pareilles expériences.

385. Conclusions relatives à l'équivalent mécanique de la chaleur. — Sans multiplier davantage les exemples de déterminations numériques de l'*équivalent mécanique* de la chaleur, nous considérerons comme démontrées les deux conclusions suivantes :

1° Une certaine quantité de chaleur, consommée sans déterminer une élévation de température dans les corps auxquels elle a été fournie, produit une certaine quantité de travail, savoir 425 kilogrammètres par grande calorie.

2° Une certaine quantité de travail, dépensée sur un corps sans appa-

(*) Il est bien entendu qu'on a fait subir à ces nombres les corrections dues aux pertes de chaleur par rayonnement ou par conductibilité.

rition de force vive, et sans production d'un travail équivalent, produit dans le corps une certaine quantité de chaleur, savoir $\frac{1}{425}$ de grande calorie par kilogrammètre.

Cette *équivalence*, entre la chaleur dépensée ou produite, et le travail produit ou dépensé, doit être considérée comme un résultat expérimental, indépendant de toute hypothèse sur la nature de la chaleur. — Nous allons maintenant faire concevoir comment la *thermodynamique* ou *théorie mécanique de la chaleur* établit, entre les phénomènes de la chaleur et ceux du mouvement, une identité complète.

II. — INTERPRÉTATION MÉCANIQUE DES DIVERS EFFETS PRODUITS PAR LA CHALEUR.

386. La chaleur envisagée comme un mode de mouvement. — Lorsqu'un corps, animé d'une certaine vitesse, vient rencontrer un obstacle rigide, on observe trois effets, qui semblent, au premier abord, très différents les uns des autres :

1° Le corps prend *un mouvement de translation*, dans une direction différente de sa direction primitive, mouvement dans lequel ne se retrouve, en général, qu'une partie de la force vive initiale.

2° Il se produit *un son*, c'est-à-dire un mouvement vibratoire, en vertu duquel certaines portions du corps oscillent autour de leur position d'équilibre. — On doit donc regarder une partie de la force vive primitive de translation comme ayant été employée à accomplir un travail, en écartant les points vibrants de la position où les actions moléculaires tendaient à la maintenir. Cet écart une fois produit, les actions moléculaires ramènent les points vibrants vers leurs positions relatives initiales, positions qu'ils dépassent en vertu de leur vitesse acquise, et ainsi de suite (*).

3° Enfin, il y a production *de chaleur*, et nous avons montré que, dans le cas actuel, cette production de chaleur correspond à la disparition d'une partie de la force vive de translation (380).

Les deux premiers effets sont des phénomènes de mouvement, dans chacun desquels se trouve une partie de la force vive primitive. — L'hypothèse fondamentale de la thermodynamique consiste à considérer le troisième effet, c'est-à-dire la production de chaleur, comme étant encore un phénomène *de mouvement*. — Dans cette théorie, on admet que les molécules des corps sont constamment animées de mouvements vibratoires, mais que, pour chaque corps, à mesure que la *température* s'élève, les mouvements vibratoires deviennent plus rapides, et par

(*) Ce mouvement, qui durerait indéfiniment dans le vide, s'éteint plus ou moins rapidement dans l'air, parce que la force vive des points vibrants se transmet progressivement à l'air.

suite la force vive de chaque molécule devient plus grande (*). — La somme des forces vives de toutes les molécules d'un corps constitue alors une fraction de l'*énergie actuelle* de ce corps (30) : suivant que sa température s'élève ou s'abaisse, on doit considérer l'énergie actuelle de ce corps comme augmentant ou diminuant.

Avant d'aller plus loin, remarquons que, s'il en est ainsi, le principe de l'*équivalence* entre le travail dépensé ou produit et la chaleur produite ou dépensée (385) est un cas particulier du principe des forces vives.

Dans la théorie moderne de la chaleur, fournir une certaine quantité de chaleur à un corps, c'est faire passer dans ce corps une certaine quantité d'énergie de mouvement. Nous allons analyser successivement, à ce point de vue, les effets divers que peut produire une addition de chaleur à un corps gazeux, solide ou liquide.

387. Effet d'une addition de chaleur, sur un gaz assujetti à conserver un volume constant. — Élévation de température. — Lorsqu'on fournit de la chaleur à une masse de gaz assujettie à conserver un volume constant, cette chaleur est employée tout entière à élever la température du gaz; ou, dans le langage de la théorie moderne, à *accroître son énergie actuelle*. — Il y a bien accroissement de la force élastique du gaz; mais il n'y a *aucun travail extérieur* effectué, puisque les parois de l'enceinte demeurent immobiles. On doit envisager cet accroissement de force élastique comme étant simplement une manifestation de l'accroissement de force vive des molécules.

Daniel Bernouilli a émis, dès 1738, une hypothèse sur la constitution des gaz, qui permet de se rendre compte de leurs diverses propriétés, et, entre autres, de celle dont il s'agit ici. — D'après Bernouilli, les molécules gazeuses, n'exerçant les unes sur les autres aucune action sensible, sont animées de mouvements rectilignes dans tous les sens, avec une vitesse constante pour chacune d'elles, et la valeur de cette vitesse dépend de la température elle-même. La *pression* qu'une masse gazeuse exerce sur la paroi qui la contient, est due à la succession des chocs de ses molécules, qui viennent s'y heurter pour prendre un mouvement en sens contraire. Dès lors, une addition de chaleur communiquée à une masse gazeuse, sous volume constant, en augmentant la vitesse des molécules, donne à la fois à ce gaz la propriété d'accuser *une température plus élevée*, ce qui est la manifestation ordinaire de l'accroissement de force vive intérieure, et la propriété d'exercer sur les parois de son enceinte *une pression plus grande*, résultant de ce que les molécules viennent choquer la paroi avec une vitesse plus grande, et à des intervalles plus fréquents.

(*) Ces vibrations *calorifiques* se distinguent des vibrations sonores par des caractères essentiels. — Les vibrations *sonores* consistent en des déformations périodiques qui se produisent inégalement dans les diverses parties du corps ébranlé : elles sont souvent assez prononcées pour être perceptibles à la vue : par l'intermédiaire de l'air, elles deviennent sensibles à notre oreille. — Les vibrations *calorifiques* affectent, d'une manière égale, tous les points d'un corps dans lequel la température est devenue uniforme; le mouvement périodique qui les constitue est inappréciable à la vue, et ne se manifeste au toucher que par la sensation spéciale de *chaleur*.

On dit quelquefois que toute la chaleur fournie au gaz reste à l'état de *chaleur sensible au thermomètre*. — Les expériences calorimétriques ont montré que pour échauffer 1 kilogramme d'air de 1°, sans variation de volume, il faut lui fournir 0^{c},1688.

388. Effets d'une addition de chaleur, sur un gaz soumis à une pression constante. — Élévation de température et production d'un travail extérieur. — Supposons maintenant que l'on fournisse de la chaleur à une masse gazeuse, dans des conditions telles que *la pression reste constante.*

Soit, par exemple, une masse d'air contenue dans un ballon de verre A (*fig.* 252), et séparée de l'air extérieur par une bulle de

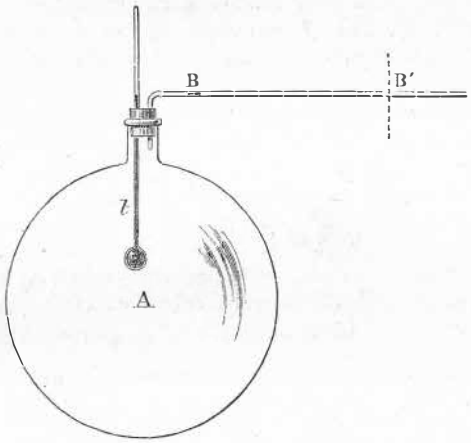


Fig. 252.

liquide B, introduite dans un tube horizontal. L'expérience constate à la fois : 1° un *accroissement de volume* du gaz, mesuré ici par le volume de la portion du tube BB′ que la bulle liquide parcourt en se déplaçant; 2° une *élévation de température*, que l'on peut constater en plaçant un thermomètre sensible *t* au sein de la masse.

L'accroissement de volume du gaz correspond à un *travail extérieur* effectué, puisqu'il y a déplacement d'une portion de la paroi de l'enceinte, soumise extérieusement à la pression atmosphérique. Dans la disposition actuelle, la valeur de ce travail s'obtiendrait en multipliant la force avec laquelle l'atmosphère presse une surface égale à la section du tube, par la longueur du chemin parcouru par la bulle (*). —

(*) L'expression du *travail extérieur* peut encore être présentée sous une autre forme. — Soient s la section du tube, b la longueur BB′ dont la bulle se déplace, et p la pression de l'atmosphère sur l'unité de surface. La force qui presse la surface de la bulle est $p \times s$; par suite, le travail accompli est $p \times s \times b$; mais, en remarquant que

L'élévation de température du gaz constitue un *accroissement de son énergie actuelle.*

Ces deux effets sont les seuls qui aient ici une valeur appréciable : l'étude attentive des phénomènes a montré que les molécules d'un gaz (supposé loin de son point de liquéfaction) ne sont assujetties les unes aux autres par aucune force intérieure, d'où résulte que l'écartement nouveau qu'elles éprouvent ne correspond à *aucun travail intérieur*, et par conséquent, à aucune variation de l'énergie potentielle (31). — C'est d'ailleurs ce que Joule a vérifié, par des expériences directes.

Pour échauffer 1 kilogramme d'air de 1°, en laissant varier son volume de manière que la pression reste constante, les expériences calorimétriques ont montré qu'il faut lui fournir $0^c,2377$. — L'excès de ce nombre sur $0^c,1688$ (chaleur spécifique de l'air à volume constant) représente donc la quantité de chaleur qui est équivalente au travail extérieur.

Nous allons montrer comment, de ce résultat d'expériences calorimétriques, on peut déduire une nouvelle détermination de l'équivalent mécanique de la chaleur.

389. Détermination de l'équivalent mécanique de la chaleur, au moyen des propriétés connues des gaz. — Évaluons le travail extérieur correspondant à la dilatation d'un kilogramme d'air, qui passe de 0° à 1° sous la pression normale : cette pression, évaluée en kilogrammes par mètre carré, est 10 333. Le mètre cube d'air à 0° pesant $1^{kg},293$, le volume occupé par 1 kilogramme d'air dans les conditions initiales est $\frac{1}{1,293}$, c'est-à-dire $0^{mc},7734$; l'accroissement de volume u, pour une élévation de température de 1 degré, s'obtiendra en multipliant ce nombre par le coefficient de dilatation 0,00367 ; donc le travail extérieur, égal au produit $p \times u$ (note de la page précédente), est $10\,333 \times 0,7734 \times 0,00367$, ou $29^{kgm},3290$. — D'après ce que nous venons de voir (388), à ce travail effectué correspond une dépense de chaleur de $0^c,2377 - 0^c,1688$, ou $0^c,0669$. En divisant la valeur du travail par le nombre de calories, on obtient, en kilogrammètres, l'équivalent mécanique de la grande calorie, déterminé au moyen des propriétés de l'air, savoir

$$\frac{29,3290}{0,0689} = 425,68\ (*).$$

le produit $s \times b$ n'est autre chose que l'accroissement de volume u de la masse gazeuse, on peut représenter le travail extérieur par $p \times u$, c'est-à-dire qu'il est *égal au produit du nombre qui représente la pression atmosphérique* (évaluée en kilogrammes par mètres carrés), *par l'accroissement de volume du gaz* (évalué en mètres cubes). — On démontre que cette expression convient également au cas où l'accroissement de volume de gaz se fait par le déplacement des diverses parties de la paroi, dans diverses directions.

(*) Le même calcul, appliqué à d'autres gaz, conduit à des résultats numériques

390. Effets d'une addition de chaleur, sur les corps solides ou liquides. — Élévation de température et production de travail intérieur. — Lorsqu'on fournit une certaine quantité de chaleur à un corps *solide* ou *liquide*, elle produit, comme dans un gaz, des effets de diverses natures; mais les proportions relatives de chaleur qui correspondent à chacun de ces effets sont tout autres.

Fournissons à un bloc de fer, ayant pour volume 1 décimètre cube, la quantité de chaleur nécessaire pour élever sa température de 100 degrés. — Le coefficient de dilatation cubique du fer étant beaucoup moindre que celui des gaz, l'accroissement de volume est beaucoup plus petit qu'il ne serait pour un gaz; par suite, le *travail extérieur* effectué est très petit. Mais c'est surtout par comparaison avec le travail intérieur, que le travail extérieur actuel va nous apparaître comme comme une quantité négligeable. — Si en effet on voulait produire, sur ce même bloc de fer maintenu à sa température primitive, un accroissement de volume pareil à celui que produit ici la chaleur, l'expérience montre qu'il faudrait exercer, sur chacune de ses faces, une traction de plusieurs centaines de mille kilogrammes par mètre carré (*). Dès lors, les molécules de ce corps doivent être considérées comme maintenues à des distances déterminées, par des forces considérables. La chaleur, en écartant les molécules les unes des autres, accomplit donc ici un *travail intérieur*, qu'il est difficile d'évaluer avec précision, mais dont la valeur est très grande. — En outre, la température s'étant élevée de 100°, il y a eu accroissement de *chaleur sensible*.

En général, on peut dire qu'une quantité de chaleur déterminée fournie à un corps solide ou liquide, se répartit de la manière suivante : — 1° Une partie de cette chaleur, généralement négligeable, est employée à l'accomplissement du travail extérieur. — 2° Une autre partie est employée à faire varier l'écartement des molécules, malgré les forces moléculaires : elle produit ainsi un accroissement de l'*énergie poten-*

très voisins, tant qu'il s'agit de gaz très éloignés de leur point de liquéfaction, comme l'hydrogène, l'oxygène ou l'azote. — On trouve des nombres beaucoup plus grands, quand on l'applique à l'acide carbonique ou au protoxyde d'azote; on doit en conclure que, pour ces derniers gaz, le travail intérieur qui accompagne les changements de volume ne peut plus être regardé comme négligeable : les forces intérieures ne peuvent être considérées comme nulles que pour un gaz qui présenterait *l'état parfait*.

(*) Rappelons ici quelques faits bien connus, qui montrent la grandeur des effets mécaniques que peuvent produire les corps solides ou liquides, lorsqu'ils éprouvent des variations de température, dans des conditions où des obstacles résistants tendent à s'opposer à leurs variations de volume.

Des barres de fer, scellées à leurs deux extrémités dans la pierre, peuvent occasionner, par leurs variations de température, des ruptures dans les édifices les plus solides. — Si l'on ne ménageait pas des intervalles entre les rails successifs d'une voie ferrée, les chaleurs de l'été arriveraient à produire des déformations de la voie.

Lorsqu'un vase de verre a été entièrement rempli d'un liquide, et hermétiquement bouché, il suffit d'une élévation de température de quelques degrés pour briser le vase, alors même qu'il présente une grande résistance.

tielle (31); c'est la partie la plus considérable. — 3° La partie complémentaire, restée à l'état de chaleur sensible au thermomètre, produit un *accroissement de l'énergie actuelle.*

391. Passage de l'état solide à l'état liquide. — Chaleur de fusion. — Quand un corps solide atteint une température déterminée, une nouvelle addition de chaleur le fait passer, en totalité ou en partie, à l'état liquide; c'est le phénomène de la fusion.

Or, de ce que la température reste constante pendant tout le temps que dure la fusion, on doit conclure que l'énergie actuelle n'a subi aucun accroissement. — Quant au travail extérieur, il est négligeable, lorsque le corps est placé dans l'atmosphère, eu égard à la petitesse de la variation de volume (*).

La chaleur fournie est donc presque entièrement employée à un *travail intérieur* résistant, c'est-à-dire à un *accroissement d'énergie potentielle* : malgré les actions moléculaires, les molécules ont été amenées dans des positions relatives différentes de celles qu'elles avaient à l'état solide, à la même température. — Cette chaleur absorbée a d'abord reçu le nom de *chaleur latente*, pour indiquer qu'elle n'est pas sensible au thermomètre : il est préférable de l'appeler *chaleur de fusion.*

392. Passage de l'état liquide à l'état de vapeur. — Chaleur de vaporisation. — Un liquide auquel on fournit des quantités de chaleur graduellement croissantes, et dont la surface est soumise à une pression invariable, atteint en général une température à laquelle il entre en ébullition : à partir de ce moment, la température reste constante, toute la chaleur fournie étant employée à convertir le liquide en vapeur. — Voyons comment cette chaleur est utilisée.

Et d'abord, la température ne s'élevant pas, l'énergie actuelle du corps demeure constante.

Quant au *travail extérieur* effectué, il n'est pas négligeable comme il l'était dans le cas de la fusion, puisque la vapeur acquiert un volume bien supérieur à celui du liquide. Ce travail doit donc correspondre à une partie notable de la chaleur absorbée par le corps, pendant l'ébullition. — L'autre partie de la chaleur fournie correspond à un *travail intérieur* résistant; malgré les actions moléculaires qui s'exerçaient dans le liquide, les molécules ont été amenées à des distances telles, que leurs actions réciproques deviennent négligeables : *l'énergie potentielle a donc augmenté* par le passage à l'état de vapeur.

(*) Au moment de la fusion, la variation de volume est d'ailleurs tantôt un accroissement, comme cela a lieu pour la plupart des corps, tantôt une diminution, comme cela a lieu pour l'eau et pour quelques autres substances. Le travail extérieur, dû au déplacement de la surface qui supporte les pressions extérieures, est donc tantôt résistant, tantôt moteur : il est toujours négligeable dans les circonstances ordinaires. Quand on lui donne des valeurs assez grandes, en augmentant la pression extérieure, les phénomènes deviennent plus complexes : il y a à la fois variation dans la quantité de chaleur nécessaire pour produire la fusion, et modification de la température de fusion, comme on l'a vu (261).

Si l'on prend comme exemple l'ébullition de l'eau, on peut montrer, par un calcul simple, que la *chaleur de vaporisation*, c'est-à-dire la quantité de chaleur employée à la transformation du liquide en vapeur, correspond, pour $\frac{4}{13}$ de sa valeur, à l'accomplissement du travail extérieur, contre la pression atmosphérique; pour les $\frac{9}{13}$, à l'accomplissement du travail intérieur, contre les actions moléculaires qui s'exerçaient dans le liquide (*).

III. — TRANSFORMATIONS DE L'ÉNERGIE.

393. Transformations de l'énergie, dans les phénomènes physiques. — Lorsque deux corps, dans un état physique déterminé, sont mis en présence, il peut arriver qu'ils passent à un autre état. Si, pendant la durée du phénomène, les corps ont été soustraits à toute action extérieure (chaleur, électricité, lumière...), s'ils n'ont produit ou reçu aucun travail, l'énergie totale du système doit demeurer constante, l'énergie de l'un des corps augmentant au détriment de l'énergie de l'autre. — Envisageons, à ce point de vue, quelques-uns des phénomènes physiques les plus simples.

1° Considérons un phénomène de *fusion*, et soit, par exemple, 1 kilogramme de glace à 0°, que l'on plonge dans une masse d'eau chaude, à une température suffisante pour déterminer la fusion de la masse de glace tout entière. — La glace fond sans élévation de température, c'est-à-dire que cette eau n'éprouve aucun accroissement d'énergie actuelle. Toute la chaleur que la glace absorbe est employée à effectuer le travail intérieur, correspondant au déplacement de ses molécules par rapport à leurs positions moyennes primitives (391) : l'eau de fusion acquiert donc simplement un *accroissement d'énergie potentielle*. — Quant à la masse d'eau chaude dans laquelle la glace est plongée, on y constate : 1° un abaissement de température, c'est-à-dire une *diminution d'énergie actuelle*; 2° une diminution de volume, à laquelle correspond, puisque les forces intérieures sont motrices, une *diminution d'énergie potentielle*. La somme de ces deux quantités constitue la *dimi-*

(*) Voici ce calcul. — En tenant compte de la densité de la vapeur d'eau, par rapport à l'eau liquide, on trouve facilement que le volume occupé par 1 kilogramme de vapeur à 100° est égal à environ 1700 fois celui de l'eau qui l'a produite (plus exactement 1699 fois). — Pour obtenir le travail *extérieur* résistant, il suffit de multiplier la pression p (exprimée en kilogrammes par mètre carré), savoir 10 333, par l'accroissement de volume u exprimé en mètres cubes, savoir $1^{mc},699$; on trouve 17 556 kilogrammètres. Pour évaluer la *quantité de chaleur* que représente ce travail extérieur, il suffit de diviser ce nombre par l'équivalent mécanique 425, ce qui donne 41 calories : en comparant cette quantité à la quantité totale de chaleur absorbée par l'eau pendant la vaporisation, 537 calories, on voit qu'elle en est environ la treizième partie. — Le reste de la chaleur fournie pendant l'ébullition, c'est-à-dire 496 calories (ou les $\frac{9}{13}$ de la quantité totale), représente le travail *intérieur* des actions moléculaires qui s'exerçaient dans le liquide.

nution totale d'énergie de la masse d'eau chaude. — Lorsqu'on écrit que la quantité de chaleur gagnée par l'eau provenant de la fusion est égale à la quantité de chaleur perdue par l'eau chaude, on admet en réalité que, dans ce système de corps, il y a communication d'énergie d'un corps à un autre, transformation de cette énergie d'une forme en une autre, mais qu'il y a toujours *conservation* de l'énergie totale du système de corps mis en présence (*).

2° Considérons maintenant un phénomène de *condensation de vapeur*, et soit, par exemple, 1 kilogramme de vapeur d'eau à 100° sous la pression atmosphérique, séparé de l'air extérieur par un piston mobile; mettons cette vapeur en présence d'une masse d'eau froide contenue dans un calorimètre, en quantité suffisante pour déterminer la condensation de toute la vapeur, de telle sorte que la température finale soit de 100°. — L'eau du calorimètre éprouve à la fois une élévation de température, c'est-à-dire un *accroissement d'énergie actuelle*, et un accroissement de volume, c'est-à-dire un *accroissement d'énergie potentielle* (390), (en négligeant toutefois le travail extérieur correspondant à la petite variation du volume de cette eau); la somme de ces deux quantités constitue l'*accroissement* de l'*énergie totale* de l'eau du calorimètre. — La vapeur se condensant sans abaissement de température, l'eau de condensation n'a éprouvé aucune perte d'énergie actuelle; les molécules se rapprochant au moment de la condensation, les forces moléculaires sont motrices, la masse d'eau condensée a donc éprouvé une *diminution* considérable d'*énergie potentielle*. — Il ne serait pas exact, dans ce cas particulier, de considérer, comme dans le cas précédent, la perte d'énergie potentielle de la masse d'eau condensée comme égale à l'accroissement de l'énergie totale de l'eau du calorimètre. Il faut remarquer, en effet que, pendant la condensation, le piston s'est abaissé sous l'action de la pression atmosphérique; on doit donc considérer l'énergie totale du système après la condensation, comme s'étant accrue du travail effectué, sur le système des corps, par la pression atmosphérique (**).

394. — Coefficient économique des machines thermiques. — Principe de Carnot. — On donne le nom général de *machines thermiques*, aux ma-

(*) La quantité d'énergie échangée, pour la fusion de 1 kilogramme de glace, correspond, comme on l'a vu (349), à une quantité de chaleur représentée par 80 grandes calories. Elle correspond donc à une quantité de travail représentée par 80×425, ou 34000 kilogrammètres.

(**) L'accroissement d'énergie totale du calorimètre, après la condensation de 1 kilogr. de vapeur d'eau, correspond à 537 grandes calories (354), équivalentes à 228 225 kilogrammètres. — Le travail extérieur reçu par l'eau, pendant la condensation, est $\frac{228\,225}{13} = 17\,556$ kilogrammètres. La perte d'énergie potentielle de l'eau condensée est $\frac{12}{13} \times 228\,225 = 210\,699$ kilogrammètres.

chines qui servent à transformer la chaleur en travail utile. — Dans une machine à vapeur, par exemple, la chaleur dégagée par la combustion du charbon, dans le foyer, se transmet à l'eau de la chaudière : la vapeur est l'intermédiaire qui sert à la transformation d'une partie de cette chaleur en travail, par le déplacement des résistances à vaincre.

Considérons une machine à vapeur, munie d'un condenseur, et arrivée à une période d'activité régulière. Dans un intervalle de temps déterminé, une certaine quantité d'eau, puisée dans le condenseur, vient emprunter à la chaudière, que nous appellerons la *source chaude*, la quantité de chaleur Q nécessaire à sa conversion en vapeur; dans le cylindre, une partie de cette chaleur se transforme en travail, par le déplacement du piston; la vapeur revient ensuite au condenseur, que nous appellerons la *source froide*, et, en revenant à l'état liquide et dans les conditions initiales de température, elle lui abandonne une quantité de chaleur Q′. On sait mesurer ces quantités Q et Q′ (384). On en déduit la quantité de chaleur transformée en travail $Q - Q'$. — On appelle *coefficient économique* d'une machine, le rapport $\frac{Q - Q'}{Q}$ de la quantité de chaleur transformée en travail à la quantité totale de chaleur fournie.

La théorie montre que, si la machine était parfaite, son coefficient économique serait représenté numériquement par l'expression

$$\frac{T - T'}{T}, \quad \text{ou bien} \quad 1 - \frac{T'}{T},$$

dans laquelle T et T′ représentent les *températures absolues* de la source chaude et de la source froide. On entend par températures absolues, les températures comptées à partir d'un *zéro absolu*, qui serait situé, dans le thermomètre à air, à 273 degrés au-dessous de la glace fondante (*).

Cette règle, qui résulte de considérations émises par Sadi Carnot en 1824, a été désignée depuis sous le nom de *principe de Carnot*. — Le principe de Carnot est d'ailleurs applicable à toutes les questions relatives à la transformation de la chaleur en travail : il a fourni des conséquences dont l'importance est comparable à celle du principe même de l'équivalence de la chaleur et du travail.

395. Coefficient économique réel ou rendement des machines thermiques. — Les conditions de perfection, que la théorie suppose réalisées dans l'installation de la machine à vapeur, ne sont jamais pratiquement réalisables : la chaleur que la machine cède à l'air et aux corps qui l'environnent, les trépidations imprimées à ses divers organes, constituent autant de causes de déperdition d'énergie, qu'il est impossible de supprimer complétement. —

(*) On est conduit à la considération du *zéro absolu* par l'emploi du thermomètre à air (205). Dans cet instrument, le degré de température est défini par une variation de force élastique du gaz, dont la valeur est $\frac{1}{273}$ de la force élastique à la température de la glace fondante. Or, si l'on suppose que l'air passe successivement par une série de températures inférieures à celle de la glace fondante, et si l'on admet que la force élastique continue à décroître toujours de la même manière, on est conduit à ce résultat que, à 273 degrés au-dessous du zéro ordinaire, la force élastique de l'air devrait avoir diminué des $\frac{273}{273}$ de sa valeur initiale, c'est-à-dire que *la force élastique devrait devenir nulle.*

C'est cette température que l'on prend pour *zéro absolu*. — Étant donnée la température t d'un corps, comptée à partir du zéro ordinaire, on en déduit immédiatement la *température absolue* T, comptée à partir du zéro absolu, $T = 273 + t$.

On appelle *coefficient économique réel*, ou *rendement*, le rapport entre la quantité de chaleur qui correspond au travail réellement utilisé par une machine, et la quantité totale de chaleur fournie. — Quelque soignée que soit la construction de la machine, l'expérience montre que ce rapport est toujours bien inférieur au coefficient économique théorique.

Considérons, par exemple, une machine à vapeur, fonctionnant à 5 atmosphères, et où la température du condenseur serait maintenue à 40° centigrades. A la pression de 5 atmosphères, correspond, pour la vapeur d'eau, une température de 153° centigrades; la température T de la chaudière (source chaude), comptée à partir du zéro absolu, est donc $153 + 273$, ou 426. La température absolue T' du condenseur (source froide), est $40 + 273$, ou 313. Le coefficient économique *théorique* de cette machine, calculé comme il vient d'être dit (394), serait donc : $1 - \frac{313}{426}$ ou 0,26, c'est-à-dire que, théoriquement, le travail produit par la machine devrait représenter environ $\frac{1}{4}$ de la chaleur fournie. — Or, en mesurant directement, dans ces machines à moyenne pression, le travail utile et la chaleur fournie, pendant un temps déterminé, on trouve que le coefficient économique *réel* n'est guère, pour les machines les mieux construites, que $\frac{1}{8}$, ou quelquefois $\frac{1}{7}$.

Cependant l'expérience montre que le coefficient économique réel *augmente*, comme le coefficient théorique, à mesure que les machines fonctionnent *à des températures plus élevées*. Aussi est-ce dans ce sens que l'industrie tend à perfectionner la construction des machines à vapeur. — La principale difficulté qu'on rencontre, dans cette voie, consiste dans l'accroissement rapide de la force élastique de la vapeur d'eau avec la température (279) : on arriverait à atteindre des pressions dangereuses pour la sécurité. On cherche aujourd'hui à tourner cette difficulté, en employant de la vapeur *surchauffée*, c'est-à-dire en faisant passer la vapeur, après sa sortie de la chaudière, dans des tubes où elle est portée à une température beaucoup plus haute. La force élastique de cette vapeur *non saturante* n'augmente, par l'élévation de température, que comme augmenterait celle d'un gaz dans les mêmes conditions. On peut ainsi accroître beaucoup la température T, sans arriver à des pressions trop considérables.

Enfin, les *machines à gaz*, qui fonctionnent entre des limites de températures extrêmement éloignées, donnent, par cela même, un coefficient économique généralement bien supérieur à celui des machines à vapeur. Il peut atteindre et même dépasser la valeur $\frac{1}{2}$, pour certaines de ces machines.

396. Transformations de l'énergie, dans les phénomènes chimiques. — Lorsque deux corps mis en présence arrivent à se combiner chimiquement, la combinaison dégage toujours de la chaleur.

Les expériences calorimétriques ont montré que 1 gramme d'hydrogène et $35^{gr},5$ de chlore, occupant à 0° et sous la pression normale des volumes égaux, dégagent 22 grandes calories, en donnant $36^{gr},5$ de gaz chlorhydrique, à 0° et sous la pression normale, sans changement de volume. On doit donc admettre que, avant la combinaison, ces masses d'hydrogène et de chlore possédaient, *à l'état potentiel*, une énergie de 22×425 ou 9350 kilogrammètres, que l'on retrouve après la combinaison, dans le calorimètre, à l'état d'*énergie actuelle*. — Comme il n'y a aucun changement d'état physique, la *chaleur dégagée*,

proportionnelle à la diminution d'énergie potentielle, *mesure le travail résultant des affinités chimiques* au moment de la combinaison.

Quand 1 gramme d'hydrogène et 8 grammes d'oxygène, pris à une température supérieure à 100° et sous la pression atmosphérique, se combinent pour donner de la vapeur d'eau, dans les mêmes conditions de température et de pression, il y a diminution de volume; par conséquent, la chaleur dégagée 29°5, ou mieux, l'énergie correspondante $29{,}5 \times 425$ kilogrammètres, mesure la somme de l'énergie potentielle disparue et du travail reçu par les gaz au moment de la contraction. Mais le second terme de cette somme est négligeable, par rapport au premier; aussi peut-on dire d'une manière générale que, *quand deux gaz en se combinant donnent un produit gazeux, la chaleur de combinaison peut servir de mesure au travail résultant des affinités chimiques.*

La proposition n'est plus exacte lorsque la combinaison est accompagnée d'un changement d'état physique : dans ce cas, la variation d'énergie potentielle est due, à la fois, au travail des forces physiques qui interviennent dans le changement d'état et au travail des affinités chimiques.

Inversement, pour effectuer la décomposition d'un corps composé, il faut, en général, lui fournir une quantité de chaleur égale à celle que ses éléments auront dégagée au moment de leur combinaison. — En d'autres termes, pour mettre en liberté deux corps combinés, il faut emprunter, à une source de chaleur, une quantité déterminée d'énergie, qui s'accumule dans ces corps à l'état *potentiel* (*).

Les phénomènes chimiques sont donc soumis, aussi bien que tous les autres phénomènes, au principe de la *conservation de l'énergie.*

397. Principe du travail maximum. — On démontre, en Mécanique, que si un système de corps peut se mettre en équilibre dans plusieurs positions, *la stabilité de l'équilibre est d'autant plus grande, que l'énergie potentielle correspondante à cette position est plus petite.* — La combinaison de deux corps, hydrogène et oxygène, n'est donc autre chose que le passage d'une position d'équilibre à une autre position plus stable; la diminution d'énergie potentielle qui résulte de ce passage est mesurée par la quantité de chaleur dégagée dans la réaction.

Quand un système de corps est dans une position d'équilibre, il ne peut pas passer, de lui-même, à une autre position; mais si une cause extérieure vient à le déranger, il tend, en général vers la position de l'équilibre le plus

(*) Certains composés chimiques, tels que les combinaisons oxygénées de l'azote, le chlorure d'azote et quelques autres, abandonnent au contraire de la chaleur en se détruisant. Ces composés ont reçu le nom général de *corps explosifs*, parce que, dans certains cas, la chaleur mise en liberté au moment de leur décomposition peut donner à leurs éléments, amenés à l'état gazeux, une force expansive capable de produire une explosion. — Pour les composés de ce genre, c'est dans la combinaison toute formée qu'on doit admettre une énergie potentielle, se traduisant par l'apparition d'énergie calorifique, au moment où cette combinaison se détruit. Il est d'ailleurs digne de remarque qu'il est impossible de produire ces combinaisons directement, en mettant en présence leurs éléments séparés.

stable, celle qui correspond à la plus grande diminution de l'énergie potentielle. — De même, quand plusieurs corps capables de réagir les uns sur les autres sont en présence, il faut généralement, pour déterminer la réaction, les déranger de leur état d'équilibre initial, soit par une élévation de la température, soit par une étincelle électrique, soit par une brusque compression; une fois l'équilibre rompu, le système tend vers l'état d'équilibre le plus stable, c'est-à-dire que l'énergie potentielle diminuant le plus possible, les forces moléculaires accomplissent le travail moteur maximum; autrement dit, les corps tendent à donner la réaction chimique qui correspond au plus grand dégagement de chaleur.

Tel est le sens du principe du *travail maximum*, dont M. Berthelot a fait le principe fondamental de la Thermochimie.

398. Origine de la chaleur et du mouvement chez les animaux. — Chez les animaux, l'oxygène introduit dans le sang par la respiration produit une véritable combustion des éléments organiques : l'acide carbonique et la vapeur d'eau, qui apparaissent dans les produits de la respiration, proviennent de l'hydrogène et du carbone qui étaient contenus dans les aliments ou dans les tissus de l'animal, mais qui n'y étaient combinés qu'avec une faible quantité d'oxygène. De même, l'urée, qui est éliminée par les urines, est un produit de la combustion des matières azotées. — C'est la diminution d'énergie potentielle, correspondante à ces phénomènes de combustion, qui constitue la source de production de la chaleur animale.

Si maintenant l'animal exécute des mouvements, s'il produit *un travail*, une partie de l'énergie fournie par les combinaisons chimiques est employée à l'accomplissement de ce travail, absolument comme, dans une machine à vapeur en activité, une partie de la chaleur développée par le combustible est convertie en travail utile (*).

Cette manière d'envisager les phénomènes de mouvement chez les animaux, formulée dès 1845 par Jules-Robert Mayer, médecin à Heilbronn, a reçu une remarquable confirmation par les expériences de Hirn, en 1858. — Ces expériences ont montré que, pour 1 gramme d'oxygène absorbé, la quantité de chaleur restée à l'état de chaleur sensible est toujours moindre pendant le mouvement que pendant le repos. En d'autres termes, à *une même dépense d'énergie respiratoire*, correspond l'apparition d'une énergie calorifique moindre pendant le mouvement que pendant le repos; la différence représente l'énergie mécanique qui correspond au travail effectué (**).

(*) D'après M. Helmholtz, quand un homme gravit une montagne, le travail qu'il effectue en élevant son propre poids est égal à la cinquième partie de l'énergie correspondant à la combustion respiratoire effectuée pendant le même temps. En d'autres termes, le coefficient économique de la machine humaine (394) est $\frac{1}{5}$. Cette machine présente donc une perfection remarquable, eu égard aux limites étroites de température entre lesquelles elle fonctionne (395).

(**) Il est essentiel de remarquer que ces résultats ne sont pas en contradiction avec ce fait, d'observation journalière, qu'un exercice violent amène généralement

C'est donc le travail des affinités chimiques, c'est-à-dire l'énergie rendue disponible par la combustion des aliments ou des tissus, qui est en définitive la cause de nos mouvements. L'animal, doué de mouvement volontaire, ne crée pas plus la force nécessaire à l'accomplissement de ses divers actes, qu'une machine thermique ne crée la force qui rend ses organes capables d'effectuer un travail mécanique. « L'intervention de la volonté, comme l'a dit Robert Mayer, est seulement assimilable à celle du machiniste qui, dans un navire à vapeur, distribue à la machine, d'une manière intelligente, l'énergie mise en liberté par la combustion du charbon. »

399. Absorption de la chaleur solaire, pour le développement des végétaux. — Dans les végétaux, les phénomènes chimiques de la vie sont, pour ainsi dire, inverses de ceux de la vie animale. Le végétal peut être considéré comme empruntant, au milieu qui l'environne, l'eau et l'acide carbonique, pour les convertir en des composés dont l'oxygène est éliminé presque en totalité, et qui sont formés principalement d'hydrogène et de carbone; les substances des tissus végétaux sont, comme on l'a dit quelquefois, des matières *débrûlées*.

Le développement des tissus végétaux constitue donc un phénomène contraire aux affinités chimiques; il exige que le végétal emprunte, à une source extérieure, l'énergie nécessaire au travail de séparation des éléments de l'eau, de l'acide carbonique, ou d'autres substances plus ou moins complexes. — Cette source d'énergie n'est autre que le Soleil : l'énergie que la plante utilise, c'est la force vive du mouvement vibratoire des radiations solaires, qui lui parvient sous forme d'énergie calorifique ou lumineuse.

Il n'y a donc, là encore, qu'une transformation d'énergie. Les éléments des tissus végétaux, formés aux dépens de composés dont l'oxygène a été presque entièrement éliminé, ont acquis par cela même, un accroissemement d'*énergie potentielle*; cette énergie pourra reparaître à l'état d'énergie actuelle le jour où ces éléments éprouveront une combustion les ramenant à l'état d'eau et d'acide carbonique.

400. Le Soleil est la source de tout mouvement à la surface de la Terre. — L'ensemble des considérations qui précèdent, et dont Robert Mayer a fait ressortir la valeur, conduit à envisager le Soleil comme la source de toute énergie, à la surface de notre globe.

L'animal trouve, dans la combustion des matériaux de ses aliments, l'énergie nécessaire à ses mouvements (398). Or, un grand nombre

le corps humain à une température plus élevée que pendant le repos. La mesure des gaz absorbés montre, en effet, que les mouvements musculaires activent considérablement la respiration. Dès lors, *l'énergie respiratoire mise en jeu dans le même temps étant beaucoup plus considérable*, on conçoit que la température du corps puisse s'élever, bien qu'une partie de cette énergie soit employée au travail extérieur, si l'autre partie, restant à l'état d'énergie calorifique, est supérieure à la valeur qu'elle a pendant le repos. — C'est en effet ce que montrent les expériences de mesure.

d'animaux sont exclusivement herbivores : ceux qui sont carnivores se nourrissent d'animaux qui ont pris eux-mêmes au règne végétal les éléments de leurs tissus. Dès lors, toutes les substances qui interviennent, comme combustibles, dans la respiration des animaux, sont empruntées aux végétaux, soit directement, soit indirectement. — D'autre part, les végétaux empruntent à la chaleur solaire l'énergie nécessaire à la formation de ces substances combustibles elles-mêmes (399). — C'est donc la chaleur solaire qui est la source des mouvements effectués par les animaux : les végétaux constituent des intermédiaires, qui gardent en réserve l'énergie fournie par le soleil, et la fournissent à leur tour aux animaux qu'ils alimentent.

Quant aux mouvements effectués par nos machines à feu, ils empruntent à la même origine l'énergie qui y est mise en jeu. — Pour les machines alimentées par la combustion du bois, la chose est évidente, d'après ce qui vient d'être dit. — Les machines qui sont alimentées par la combustion de la houille ne font qu'emprunter, au combustible enfoui dans le sol, l'énergie que la chaleur solaire avait accumulée dans les végétaux des siècles passés.

C'est la chaleur solaire qui transforme en vapeur les eaux des mers, des lacs ou des fleuves, et qui contribue ainsi à la formation des nuages ; l'énergie accumulée par la vaporisation, dans ces masses d'eau suspendues au sein de notre atmosphère, reparaît à l'état d'énergie sensible, quand elles retombent sous la forme de pluie ou de neige, et viennent former les torrents, les rivières, les fleuves qui descendent vers la mer. — C'est la force vive de ces cours d'eau que nous utilisons, pour mettre en mouvement nos machines hydrauliques.

C'est encore la chaleur solaire qui produit, dans notre atmosphère, ces mouvements continuels qui constituent les vents, et qui transportent l'air d'une région du globe à une autre. — Quand l'homme utilise cette force vive de translation de l'air, pour gonfler les voiles des navires ou pour faire tourner les ailes des moulins, il ne fait encore qu'employer, pour un travail utile, une énergie dont l'origine est tout entière dans la force vive des radiations émises par le Soleil.

LIVRE TROISIÈME

ACOUSTIQUE

CHAPITRE PREMIER

PRODUCTION ET PROPAGATION DU SON

I. — PRODUCTION DU SON

401. Production du son en général. — Un son est toujours produit par un mouvement vibratoire, imprimé à un corps matériel.

Ainsi, quand un verre à boire a été ébranlé par un choc, il produit un son : si l'on applique le doigt sur le bord du verre, on sent une sorte de frémissement, que l'on exprime en disant que le verre *vibre*. Dès que le contact du doigt fait cesser la vibration, on entend le son s'éteindre.

Prenons de même un *diapason* (*fig.* 253), et faisons-lui rendre un son, en écartant ses branches avec une tige de bois et faisant sortir vivement la tige par l'extrémité de la fourche. En appliquant le doigt sur l'une des branches, nous la sentons vibrer, et le son s'éteint quand la vibration cesse.

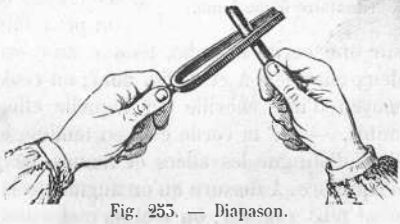


Fig. 253. — Diapason.

Les sons produits par les tuyaux d'orgue résultent également d'un mouvement vibratoire. Nous verrons que ce mouvement réside dans la masse d'air que contient le tuyau.

402. Mouvement vibratoire. — Pour nous faire une idée plus précise des mouvements qui produisent les sons, fixons dans un étau une lame d'acier AC (*fig.* 254), et laissons d'abord une assez grande longueur à la partie située au-dessus de l'étau. Si nous l'écartons avec le doigt, de manière à l'amener dans la position C*a*, et si nous l'abandonnons, nous la voyons exécuter une série de mouvements, de part et

d'autre de sa position d'équilibre; elle va de la position C*a* à la position symétrique C*a'*, revient en C*a*, et ainsi de suite. La succession d'une allée et d'une venue de la lame est ce que nous appellerons *une vibration*. — Or, si nous répétons plusieurs fois l'expérience, en raccourcissant à chaque fois la partie vibrante, nous voyons les vibrations devenir *de plus en plus rapides*. Tant qu'elles étaient assez lentes, nous pouvions les suivre des yeux; quand elles sont plus rapides, nous cessons de distinguer les allées et venues; mais l'extrémité libre de la lame nous paraît éprouver une sorte de gonflement, qui est dû à ce que notre œil l'aperçoit à la fois dans toutes les positions qu'elle occupe successivement entre C*a* et C*a'*. — Enfin, lorsque les vibrations deviennent suffisamment rapides, nous entendons un son, et la lame présente encore la même apparence.

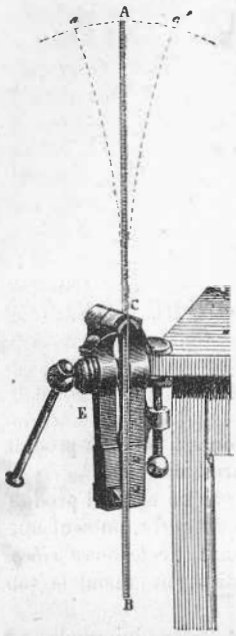


Fig. 254. — Mouvement vibratoire d'une lame.

Le *mouvement vibratoire* qui produit le son consiste donc en une succession d'allées et venues des points vibrants, de part et d'autre de leur position d'équilibre. Ce mouvement est toujours trop rapide pour que notre œil puisse le suivre : l'œil ne peut le constater que par des apparences comme celles que nous venons d'indiquer.

On peut faire des observations semblables sur une corde blanche, tendue au-dessus d'une planche noire, entre deux chevalets A et B (*fig.* 255); on règle la tension de cette corde, au moyen d'une cheville sur laquelle elle s'enroule à l'une de ses extrémités. — Si la corde est peu tendue, et si on l'écarte avec le doigt, l'œil distingue les allées et venues, de part et d'autre de la position d'équilibre. A mesure qu'on augmente la tension, les vibrations deviennent plus rapides; on n'observe bientôt plus qu'un gonflement apparent, sensible surtout vers le milieu de la corde. Enfin on entend un son, lorsque les vibrations sont devenues suffisamment rapides.

403. Caractères distinctifs des sons. Intensité, hauteur, timbre. — Nous étudierons plus tard, avec quelques détails, les caractères qui distinguent entre eux les divers sons. Mais nous pouvons dès maintenant, au moyen des expériences précédentes, préciser les conditions du mouvement qui correspondent à chacun de ces caractères.

Revenons à l'expérience de la lame vibrante (*fig.* 254), et, après avoir donné à la lame une longueur assez petite pour qu'elle puisse rendre

un son, laissons cette longueur invariable. Selon que nous écartons plus ou moins la lame, elle rend un son plus ou moins fort ; mais il est facile de constater qu'elle donne toujours *la même note musicale :* elle la donne seulement avec plus ou moins *d'intensité.* — On peut donc dire que l'*intensité* du son dépend de l'*amplitude des vibrations*, c'est-à-dire de la grandeur des allées et venues de la lame, entre ses positions extrêmes *Ca* et *Ca'* (*).

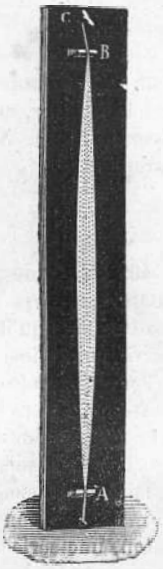


Fig. 255.
Vibration transversale d'une corde.

De quoi dépend maintenant la *hauteur* du son, c'est-à-dire le caractère musical qu'on exprime en disant qu'une note est *plus haute* qu'une autre? — Nous avons constaté que la lame vibrante, lorsqu'on la raccourcit, produit des vibrations de plus en plus *rapides.* Or, en procédant ainsi, on obtient des sons dont la *hauteur* est de plus en plus grande. — La *hauteur musicale* du son dépend donc de la *rapidité* des vibrations : la hauteur est d'autant plus grande, qu'il se produit *un plus grand nombre de vibrations* en un même temps (**).

Enfin deux sons de même hauteur et de même intensité peuvent différer par un troisième caractère, qu'on nomme le *timbre.* C'est par la différence des timbres qu'on distinguera toujours, par exemple, les sons d'une trompette de ceux d'un violon. Les causes des différences de timbres sont complexes ; nous y reviendrons plus loin (Chap. V).

404. Bruits. — Le choc d'un marteau sur une planche ou sur une pierre ne nous fait éprouver qu'une sensation vague, que nous désignons sous le nom de *bruit,* et à laquelle il paraît d'abord difficile d'attribuer un caractère de hauteur musicale.

Il n'en est plus de même, si nous comparons entre eux des bruits de *même nature.* — Ainsi, en laissant tomber sur le sol de petites planchettes de bois, dont les dimensions auront été convenablement choisies, on peut obtenir une série de bruits, donnant à l'oreille soit la sensation d'une gamme, soit celle d'un accord parfait.

(*) On peut remarquer encore que, si on laisse les vibrations se continuer quelque temps, l'intensité du son diminue progressivement, à mesure que l'amplitude diminue elle-même. Les mêmes observations peuvent être faites sur la corde vibrante (*fig.* 255).

(**) Il en est de même avec la corde vibrante. Nous savons déjà que, si l'on augmente la tension de la corde, on rend ses vibrations plus rapides. Or, en augmentant la tension, on obtient des sons de plus en plus élevés. Donc, ici encore, la hauteur du son dépend du *nombre des vibrations* qui se produisent en un temps déterminé.

C'est ainsi encore que l'on construit des *harmonicas* formés par des planchettes de bois, placées sur deux fils tendus; en frappant successivement les diverses planchettes avec un petit marteau, on peut exécuter un air.

Les bruits se distinguent donc entre eux, comme les sons, par leur *intensité*, qui dépend de l'amplitude du mouvement vibratoire; par la *hauteur*, qui dépend de la rapidité des vibrations; enfin par un *timbre* spécial. Nous reviendrons plus loin (456, 3°) sur ce dernier caractère.

II. — PROPAGATION DU SON

405. Mode de propagation du son dans l'air. — Ondes sonores. — Quand un corps sonore est mis en vibration dans l'atmosphère, les mouvements qu'il exécute se communiquent à l'air qui l'environne, et parviennent ainsi jusqu'à notre oreille.

Pour se rendre compte de la manière dont s'effectue cette transmission du mouvement vibratoire, il suffit d'observer ce qui se produit à la surface d'une eau tranquille, lorsqu'on y laisse tomber une pierre. Le choc de la pierre donne naissance à une petite vague, de forme circulaire, qui s'éloigne progressivement du point où elle s'est formée. — Si maintenant on produit, à la surface de l'eau, avec l'extrémité d'un bâton, une série de chocs se succédant à intervalles réguliers, la succession de ces mouvements produit une succession de vagues semblables, courant les unes à la suite des autres, autour du point où elles se forment. — Cependant, si l'on regarde avec attention un petit corps flottant à la surface de l'eau, comme un bouchon ou un brin de paille, on voit qu'il est soulevé chaque fois qu'il est rencontré par une vague, mais qu'il reste toujours sensiblement à la même place. Cette observation montre que les ébranlements communiqués à l'eau ont pour effet d'imprimer à chacun de ces points un mouvement de va-et-vient, semblable à celui du point d'où partent les ébranlements eux-mêmes, mais qu'il n'y a pas transport de l'eau d'un bord vers l'autre.

Ce phénomène est l'image de ce qui se produit dans l'atmosphère, autour d'un corps sonore; chacun des mouvements exécutés par le corps se communique successivement, et de proche en proche, à l'air qui l'environne. On donne, par analogie, le nom *d'ondes sonores*, aux couches d'air ébranlées à la suite des unes des autres, autour du point où se produisent les vibrations. — Dans la production de ces ondes, il n'y a pas transport de la masse d'air : chacun des points ébranlés exécute simplement de petits mouvements de *va-et-vient*, semblables à ceux qui constituent le mouvement vibratoire du corps sonore lui-même. — Enfin, notre oreille perçoit le son, par le mouvement vibratoire transmis à la couche d'air qui est en contact avec elle.

Nous reviendrons plus loin (413 et 414), avec un peu plus de détails, sur la production des ondes sonores, et sur le mode de constitution de chacune d'elles.

406. Le son ne se propage pas dans le vide. — Lorsqu'un corps est mis en vibration dans le vide, ses vibrations ne peuvent plus se transmettre à notre oreille. On le démontre en prenant un ballon de verre (*fig.* 256), dans lequel se trouve une clochette suspendue par un fil. Quand le ballon contient de l'air à la pression ordinaire, il suffit de l'agiter pour entendre le son de la clochette : les vibrations sont transmises, par l'air du ballon, à la paroi de verre; puis, par la paroi de verre, à l'air environnant, et enfin à notre oreille. — Si l'on fait le vide dans le ballon, on n'entend plus le son de la clochette. — Si l'on ouvre progressivement le robinet du ballon, de manière à y laisser rentrer lentement l'air, on constate que le son, d'abord très faible, reprend son intensité primitive lorsque la pression de l'air dans le ballon a repris sa première valeur.

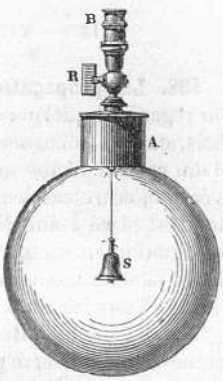


Fig. 256.
Le son ne se propage pas dans le vide.

Cette dernière remarque montre que l'air, lorsqu'il est *raréfié*, transmet le son avec *moins d'intensité* que lorsqu'il est à la pression ordinaire. — Au sommet des hautes montagnes, où la pression de l'air est bien moindre que dans la plaine, le son de la voix est affaibli. Les mêmes observations ont été faites dans les ascensions en ballon, à de grandes hauteurs dans l'atmosphère.]

407. Propagation du son par les liquides et par les solides. — Les *liquides* peuvent transmettre les vibrations sonores. Un ouvrier placé au fond de l'eau, dans une cloche à plongeur, entend les bruits qui se produisent sur le rivage. L'observation montre aussi que les poissons entendent les bruits qui se produisent autour d'eux.

Les corps *solides* transmettent aussi les sons : ils les transmettent même, en général, beaucoup mieux que l'air. — En appliquant l'oreille à l'extrémité d'une longue poutre, on entend distinctement les chocs produits, à l'autre extrémité, par une pointe d'épingle, ou le tic-tac d'une montre placée contre la poutre. — En appliquant l'oreille sur le sol, on entend, à plusieurs kilomètres de distance, le roulement d'une voiture. On peut entendre ainsi une décharge d'artillerie, à des distances où l'air n'en apporte plus aucun bruit perceptible (*).

(*) Voici encore une expérience que chacun peut répéter. On place entre ses dents la queue d'une montre et on applique les mains sur ses deux oreilles, de manière à les boucher hermétiquement. On entend le tic-tac de la montre, transmis par les dents

Cependant certains corps, comme les draperies, l'étoupe, le coton cardé, transmettent si imparfaitement les mouvements vibratoires, qu'on peut les employer pour amortir les sons. — C'est ce qui explique l'usage que l'on fait des portières en étoffe ou des portes rembourrées, pour empêcher d'entendre, dans une pièce, ce qui se dit dans la pièce voisine.

III. — VITESSE DE PROPAGATION DU SON

408. La propagation du son n'est pas instantanée. — Quand on regarde, à quelque distance, un bûcheron frappant sur une pièce de bois, on voit la cognée arriver sur le bois, et c'est seulement au bout d'un certain temps qu'on entend le bruit du coup. L'intervalle qui s'écoule, entre ces deux instants, est d'autant plus long que l'observateur est placé à une distance plus grande. — On peut faire la même observation en regardant des chasseurs tirer dans la plaine, à une distance plus ou moins grande.

409. Tous les sons se propagent dans l'air avec la même vitesse. — Quand nous entendons, de loin, un morceau exécuté par un orchestre, il conserve pour notre oreille le même caractère que si nous l'entendions de près. Les notes qui sont produites ensemble, par les divers instruments, nous arrivent ensemble : les notes qui se succèdent, dans un certain ordre et suivant un certain rythme, nous arrivent dans le même ordre et avec le même rythme. — Ces observations montrent que tous les sons, quelle que soit leur hauteur, leur intensité ou leur timbre, se propagent dans l'air *avec la même vitesse.*

Dès lors, pour étudier la propagation du son, on peut employer un son quelconque. — On a choisi, comme nous allons le voir, un son qui pût être entendu à une très grande distance, afin que le temps écoulé, entre le moment de sa production et le moment de son arrivée, fût assez long pour être facilement mesurable.

410. Le mouvement de propagation du son est un mouvement uniforme. — Dès l'année 1738, des expériences avaient été entreprises, par une Commission de l'Académie des sciences, pour mesurer la vitesse du son dans l'air. Une pièce de canon ayant été placée sur un lieu élevé, des observateurs situés à diverses distances déterminaient les intervalles de temps qui s'écoulaient, entre l'instant où ils apercevaient la lueur du coup de canon et celui où le son leur parvenait. — Dans ces expériences, on avait négligé quelques causes d'erreurs, dont on reconnut plus tard l'influence. Mais elles servirent au moins à constater que le son met un temps double, triple, quadruple, pour parcourir une

et par les os de la tête. — On peut faire entendre des paroles à certains sourds, en employant une feuille de carton dont ils serrent le bord entre les dents, et en émettant fortement la voix contre cette feuille.

distance double, triple, quadruple, c'est-à-dire que le mouvement de propagation du son est un *mouvement uniforme*.

Nous appellerons *vitesse du son*, l'espace (exprimé en mètres) que parcourt le son en une seconde.

411. Détermination de la vitesse du son dans l'air. — En 1822, le Bureau des longitudes reprit la détermination de la vitesse du son dans l'air, en cherchant à introduire dans les expériences toute la précision possible.

Les observateurs s'étaient partagés en deux groupes, placés, l'un sur les hauteurs de Villejuif, l'autre sur les hauteurs de Montlhéry; une pièce de canon était disposée à chacune de ces deux stations. Les observations furent faites pendant la nuit, de la manière suivante. — Un coup de canon étant tiré à Villejuif, les observateurs placés à Montlhéry déterminaient, avec une montre à secondes, l'intervalle de temps écoulé entre le moment où ils apercevaient de la lumière et le moment où ils entendaient la détonation; la lumière pouvant être considérée comme franchissant une distance de quelques kilomètres en un temps tout à fait négligeable, l'intervalle que l'on avait observé mesurait le temps nécessaire à la transmission du son, d'une station à l'autre. — Mais, comme la direction du vent pouvait avoir une influence sur le phénomène, on recommençait l'expérience en sens inverse, c'est-à-dire qu'on tirait ensuite un coup de canon à Montlhéry, et les observateurs de Villejuif effectuaient une détermination semblable. — On répéta plusieurs fois l'expérience, les deux stations alternant toujours entre elles; enfin, on prit la moyenne des résultats obtenus.

On trouva ainsi que le son mettait à peu près 55 secondes pour parcourir la distance d'environ 18 700 mètres. — Pour obtenir la valeur de la *vitesse du son*, c'est-à-dire l'espace parcouru en *une seconde*, il suffisait de diviser 18 700 mètres par 55, ce qui donne

340 mètres par seconde.

Cette vitesse se rapporte aux conditions dans lesquelles se trouvait l'air au moment des expériences. La température était d'environ 15°, et la pression était voisine de la pression normale : ce sont donc les conditions les plus ordinaires. — Des expériences plus récentes de Regnault, effectuées dans des conditions très variées, ont montré que, pour des températures peu différentes, la vitesse du son augmente ou diminue, dans le même sens que la température, d'environ $0^m,6$ pour un degré. — Il en résulte que, à la température de 0°, la vitesse du son est

$340 - 0,6 \times 15$, c'est-à-dire 331 mètres par seconde (*).

(*) Pour déduire de la vitesse v, observée à la température t, la vitesse v_0 à la température zéro, on peut employer la formule suivante, qui a été donnée par Newton :

$$v_0 = \frac{v}{\sqrt{1 + \alpha t}},$$

412. Vitesse du son dans les liquides et dans les solides. — En 1827, Sturm et Colladon, par une méthode semblable à la précédente, mesurèrent la vitesse de propagation du son dans l'eau. — Les expériences furent faites sur le lac de Genève. Une cloche C (*fig.* 257),

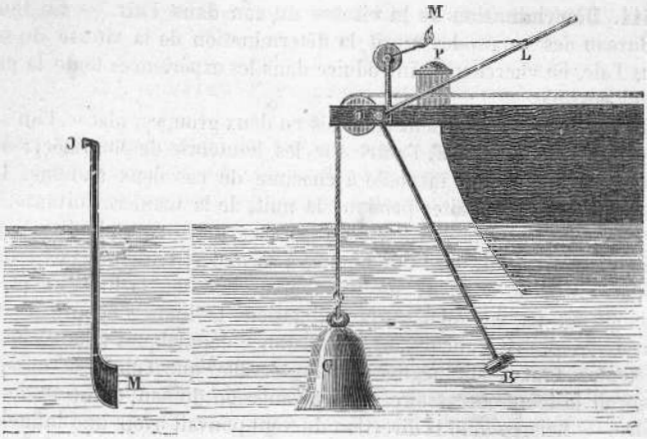


Fig. 257. — Détermination de la vitesse du son dans l'eau.

suspendue à un bateau B et plongée dans l'eau du lac, était frappée par un marteau *b* dont le manche sortait de l'eau; le mouvement du marteau entraînait une mèche qui, au moment où le choc avait lieu, mettait le feu à un tas de poudre *m*. Au rivage opposé, on notait l'instant où l'on apercevait la lumière, et l'instant où arrivait le son transmis par l'eau; ce son était perçu à l'aide d'un *cornet acoustique*, fermé en *fg* par une membrane; on appliquait l'oreille à l'extrémité supérieure *o*. — On trouva, pour la vitesse du son dans l'eau, à la température de 8°, le nombre 1435 mètres par seconde: c'est une vitesse environ quatre fois égale à la vitesse du son dans l'air.

On doit à Biot la détermination expérimentale de la vitesse du son dans la fonte de fer. — Un timbre avait été fixé à l'extrémité d'une conduite formée par des tuyaux de fonte, dont la longueur était de 951^{m},25. Un des expérimentateurs frappait un coup sur le timbre, à un certain instant. Un autre expérimentateur appliquait son oreille à

formule dans laquelle α représente le coefficient de dilatation de l'air. En remplaçant, dans les expériences du Bureau des longitudes, v par sa valeur 340,9, α par 0,00367 et t par 16°, on trouve $v_0 = 331{,}5$. — Les expériences effectuées par Regnault, dans la plaine de Satory, ont fourni, pour la vitesse de propagation du son dans l'air, à la température zéro, la valeur moyenne 330,5.

Inversement, connaissant la vitesse v_0, la formule de Newton permet de trouver la vitesse v à une température quelconque t.

l'autre extrémité de la conduite ; il entendait distinctement, à 2 secondes et demie d'intervalle, deux sons successifs, le premier transmis par le métal, le second transmis par l'air intérieur. — En désignant respectivement par a et x les vitesses du son dans l'air et dans la fonte, $\frac{951,25}{a}$ et $\frac{951,25}{x}$ représentaient les durées de la transmission par l'air et par le métal ; on avait donc

$$\frac{951,25}{a} - \frac{951,25}{x} = 2,5.$$

En résolvant cette équation, on trouve $x = a \times 10,5$; c'est-à-dire que la vitesse dans la fonte est environ dix fois et demie égale à la vitesse dans l'air.

On verra plus loin comment on a pu déterminer les vitesses du son dans les divers gaz (439), et dans les liquides (440) par une méthode indirecte, fondée sur les lois des vibrations des tuyaux sonores.

413. Propagation du son dans un tuyau cylindrique indéfini. — Longueur d'onde. — Pour concevoir comment s'effectue la propagation du mouvement vibratoire, nous considérerons d'abord, pour simplifier, le cas d'un tuyau cylindrique (*fig.* 258), que nous supposerons indéfini

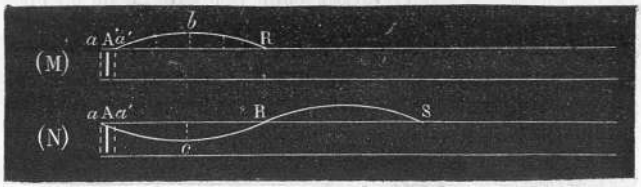


Fig. 258.

vers la droite, et à l'entrée duquel un son sera produit par une lame solide A exécutant une série de vibrations entre deux positions extrêmes a et a', d'un mouvement semblable à celui de l'extrémité de la lame représentée par la figure 254. — Nous appellerons toujours *vibration*, la succession de deux oscillations en sens inverse, c'est-à-dire le mouvement *d'allée et de retour*.

Pendant la *première demi-vibration*, la lame solide, se mouvant de a en a', avec une vitesse d'abord croissante puis décroissante, peut être considérée comme imprimant, à la tranche d'air voisine, une série d'ébranlements dont chacun se transmet aux tranches suivantes avec la vitesse de propagation du son. A l'instant où la lame arrive en a', l'ébranlement *initial* est parvenu en R, par exemple (*fig.* 258, M) ; l'ébranlement *final* est encore en a', en sorte que, à cet instant, la vitesse d'ébranlement est sensiblement nulle en a' et en R ; elle est maximum au

milieu de cet intervalle. — Chacune de ces tranches d'air, par le fait même de l'ébranlement qui lui est imprimé, éprouve d'ailleurs une *compression* proportionnelle. Si l'on représente la valeur de la compression, dans chaque tranche, par une perpendiculaire élevée sur l'arête du tuyau, la courbe qui joindra les extrémités de ces perpendiculaires présentera une forme telle que $a'b$R. — La colonne d'air a'R, à laquelle s'est communiqué le mouvement de la lame solide pendant cette demi-vibration, s'appelle une *demi-onde condensée*. La distance a'R s'appelle la *demi-longueur d'onde* (*).

Pendant *la seconde demi-vibration*, le mouvement de la lame solide ayant lieu vers la gauche, de a' en a (*fig.* 258, N), la tranche d'air qui est en contact avec elle, du côté du tuyau, reçoit une série d'ébranlements, vers la gauche, et chacun de ces ébranlements produit une *dilatation*. La propagation s'effectuant toujours avec la vitesse de propagation du son, la colonne d'air aR contient, au bout de cette seconde demi-vibration, une *demi-onde dilatée* qui peut être représentée par la branche de courbe acR, située au-dessous de la droite aR. En même temps, la demi-onde condensée s'est transportée en RS. — La distance aS est ce qu'on appelle la *longueur d'onde*.

On voit ainsi que, pendant le mouvement continu de la lame solide, on peut se représenter l'état de l'air dans le tuyau, *aux instants successifs*, en imaginant que la courbe ARST (*fig.* 259), dont les diverses

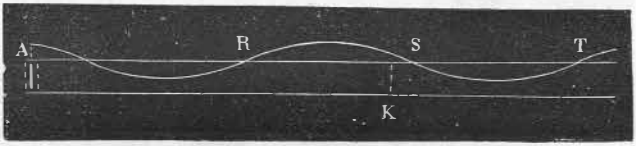


Fig. 259.

parties se reproduisent progressivement d'une manière toujours identique, se transporte d'un mouvement continu vers la droite, avec une vitesse égale à la vitesse de propagation du son. Or, considérons une tranche quelconque K du tuyau. La figure 259 représente la position de la courbe au moment où parvient en K une demi-onde *condensée*. Pendant le temps que cette demi-onde met à traverser la tranche K, c'est-à-dire pendant la durée d'une demi-vibration de la lame solide, cette tranche acquiert des vitesses d'ébranlement d'abord croissantes, puis décroissantes, et toujours dirigées vers la droite. Une demi-onde *dilatée* arrive ensuite à la tranche K et lui communique, pendant le même

(*) Il est essentiel de remarquer que ce sont les vitesses d'ébranlement et les compressions qui se déplacent, dans la longueur du tuyau, et non pas les tranches d'air. Chaque tranche ne se déplace que *d'une quantité très petite*, pour transmettre à la tranche suivante la compression qu'elle a reçue de la tranche qui la précède.

temps, des vitesses d'ébranlement d'abord croissantes, puis décroissantes, mais dirigées vers la gauche; et ainsi de suite. — Donc, en définitive, une tranche d'air quelconque, prise dans le tuyau, vibre *comme la lame solide*, entre deux positions extrêmes, peu distantes l'une de l'autre. La durée d'une vibration de cette tranche est égale à la durée d'une vibration de la lame solide.

414. Propagation du son dans un milieu indéfini en tous sens. — Diminution progressive d'intensité. — Lorsque le mouvement vibratoire se produit dans un milieu indéfini en tous sens, comme l'atmosphère, la transmission du mouvement s'effectue dans toutes les directions, avec la même vitesse que dans un tuyau cylindrique. — Dès lors, si A est le point d'où émanent les vibrations (*fig.* 260), le mouvement se communique, pendant la durée de la première demi-vibration, à l'air compris dans une sphère PQ ayant pour centre A et pour rayon la demi-longueur d'onde. Puis, cette même sphère reçoit les mouvements correspondants à la seconde demi-vibration, en même temps que les mouvements correspondants à la première se propagent dans l'espace compris entre la surface PQ et la surface P′Q′ d'une sphère de rayon double; et ainsi de suite. — Or les volumes d'air compris entre les surfaces sphériques consécutives PQ,P′Q′,P″Q″ ..., vont en augmentant : il en résulte que les *amplitudes* des mouvements vibratoires acquis par les couches d'air successives vont en diminuant, c'est-à-dire que l'*intensité du son va en décroissant*, à mesure qu'on s'éloigne du point A. Dans une direction déterminée AM, la courbe ARST..., qui représente, à un instant déterminé, l'état de l'air aux différents points de cette droite, va en se rapprochant de plus en plus de la droite elle-même.

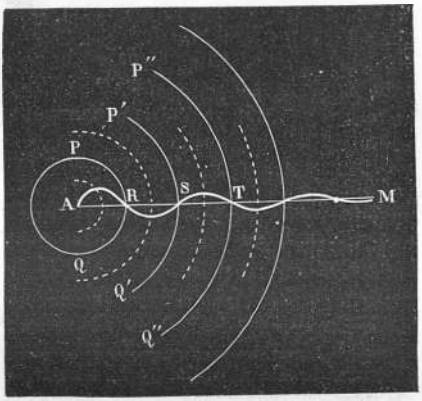


Fig. 260. — Propagation d'un mouvement vibratoire dans un espace indéfini en tous sens.

L'observation montre en effet que, dans l'atmosphère, l'intensité du son perçu est d'autant plus faible que l'oreille est placée plus loin du corps sonore.

415. Propagation du son dans un tuyau indéfini. — Conservation de l'intensité. — Dans un tuyau cylindrique, les ondes successives conservant un volume constant, le son conserve une *intensité sensiblement constante* à toute distance. La seule cause de diminution

d'intensité consiste dans les frottements que l'air éprouve, dans ses mouvements, contre les parois du tuyau.

On connaît l'emploi que l'on fait des *tubes acoustiques* (*fig.* 261), pour transmettre la voix au travers des murs ou des planchers. Ce sont des

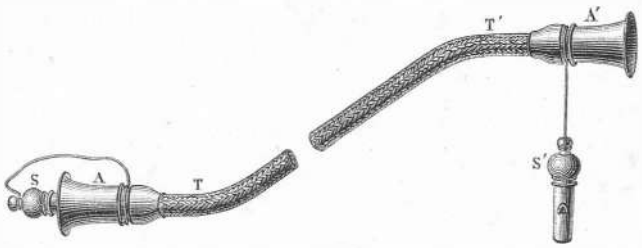


Fig. 261. — Tube acoustique.

tubes de caoutchouc TT', terminés à chacune de leurs extrémités par une embouchure en forme d'entonnoir, A, A'. Dans chacune des embouchures, on engage un sifflet S, destiné à jouer le rôle d'avertisseur. — Lorsqu'une personne placée à l'extrémité A' veut entrer en conversation avec une autre personne placée à proximité de A, elle enlève le sifflet S', et souffle fortement dans le tube, de manière à faire résonner le sifflet S. Cet appel ayant été entendu et les deux sifflets étant enlevés, la conversation peut s'engager presque à voix basse : celui qui parle place sa bouche contre l'embouchure, tandis que celui qui écoute applique son oreille à l'embouchure de l'autre extrémité.

416. Relation entre la vitesse du son et la longueur de l'onde. — Si l'on imagine qu'un son soit produit à l'ouverture d'un tuyau indéfini, contenant de l'air, la vitesse de propagation du son dans l'air étant environ 340 mètres par seconde, l'extrémité antérieure de la première onde produite doit se trouver, au bout d'une seconde, à 340 mètres du point de départ. Si, pendant une seconde, le corps vibrant a exécuté 400 vibrations, cet espace de 340 mètres se décompose alors en 400 parties égales, dont chacune représente *la longueur d'onde*. — Le même raisonnement s'applique au cas où le son se propage dans un milieu indéfini en tous sens.

En général, soit v la vitesse de propagation du son dans un milieu quelconque; soient n le nombre de vibrations, par seconde, d'un son déterminé, et λ la longueur particulière de l'onde correspondante à ce son ; on aura

$$\lambda = \frac{v}{n}.$$

Cette relation permet de calculer l'une des trois quantités v, n, λ, lorsqu'on connaît les deux autres.

IV. — RÉFLEXION DU SON

417. Réflexion du son. — Lorsque des ondes sonores PQ, P′Q′, P″Q″..., émanées d'un point A (*fig.* 262), et se propageant dans l'air, par exemple, viennent rencontrer un plan rigide MM′, le mouvement vibratoire ne peut plus se transmettre au delà de ce plan : les molécules d'air qui sont au voisinage du plan, au moment où elles sont ébranlées, rebondissent sur la surface du plan, en sorte que les vitesses d'ébranlement changent de signe. Il se produit ainsi une série d'ondes *réfléchies* RS, R′S′..., se propageant en sens inverse des ondes directes.

Ce phénomène, qui constitue la *réflexion du son*, est absolument analogue au phénomène de la réflexion de la lumière, que nous étudierons plus loin. — Un point lumineux A étant placé en face d'un miroir plan, nous verrons que la lumière se comporte, après réflexion, comme si elle émanait d'un point A′, symétrique du point A par rapport au miroir, et qu'on appelle l'*image* du point lumineux A. — De même, les ondes sonores réfléchies (*fig.* 262) se comportent comme si elles émanaient du point A′, symétrique de A par rapport au plan MN : le point A′ est ce qu'on peut appeler l'*image sonore* du point A.

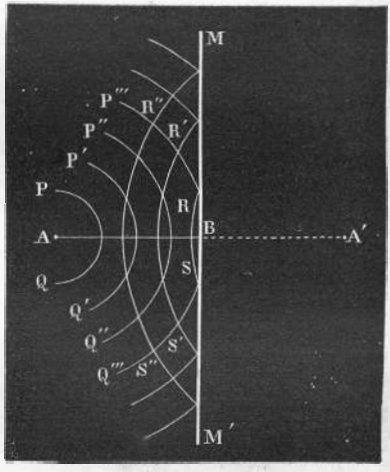


Fig. 262. — Réflexion des ondes sonores.

L'identité des lois de la réflexion du son avec les lois de la réflexion de la lumière peut se démontrer par l'expérience suivante. — On place, devant un miroir sphérique concave, la lumière d'une bougie, en un point qu'on appelle le *foyer principal* du miroir : la lumière émise par la bougie est réfléchie par le miroir, dans une direction parallèle à son axe. On la reçoit sur un autre miroir sphérique, disposé en face du premier, à une distance de plusieurs mètres : il la réfléchit à son tour, et la concentre en son foyer principal, de manière à éclairer vivement un petit écran placé en ce point. Si l'on remplace la bougie par une montre, et qu'on mette l'oreille au point où se trouvait l'écran, on perçoit distinctement le tic tac de la montre, qui devient imperceptible dans toute autre position (*).

(*) Un phénomène analogue se produit dans une des salles du Conservatoire des Arts

Le *porte-voix* (*fig.* 265), dont on se sert pour transmettre la voix dans une direction déterminée et à une assez grande distance, est un

Fig. 265. — Porte-voix.

tube de forme conique AB, présentant une large embouchure E dans laquelle on émet la voix. Les réflexions qu'éprouvent les vibrations sonores, à l'intérieur du tube, les amènent à se propager, au sortir du pavillon P, dans une direction parallèle à son axe : la voix peut ainsi porter à une distance beaucoup plus grande que si elle était émise à l'air libre.

Fig. 264. Cornet acoustique.

Le *cornet acoustique* (*fig.* 264) dont se servent les personnes qui ont l'ouïe dure, est un tube conique, de dimensions beaucoup plus petites, et recourbé à ses extrémités. Le sommet S du cône étant introduit dans l'oreille, et le pavillon P étant tourné vers le point où se produisent les sons que l'on veut entendre, l'instrument recueille les vibrations qui viennent frapper sa partie élargie, et les fait converger vers l'oreille.

418. Échos. — Il n'est personne qui n'ait entendu le phénomène de l'*écho*. Un cri étant poussé à une certaine distance d'un obstacle, comme un mur ou une montagne, les vibrations renvoyées par cet obstacle reviennent à l'oreille, au bout d'un temps plus ou moins long.

Pour nous rendre compte des conditions dans lesquelles l'écho peut s'entendre distinctement, supposons, par exemple, que l'obstacle soit placé à 170 mètres ; le son doit alors parcourir, dans l'aller et retour, une distance de 2 fois 170 mètres, ou 340 mètres : c'est précisément l'espace que le son parcourt en une seconde. Donc, dans ce cas, c'est *au bout d'une seconde* qu'on entend l'écho. — Selon que la distance de l'obstacle est plus ou moins considérable, le temps qui s'écoule, avant le retour de l'écho, augmente ou diminue proportionnellement. Or, notre oreille ne peut distinguer deux sons successifs, que s'ils sont séparés par un intervalle de temps au moins égal à $\frac{1}{10}$ de seconde. Mais en $\frac{1}{10}$ de seconde, le son parcourt environ 34 mètres. Dès lors, le son direct ne pourra se distinguer du son dû à la réflexion, que si la distance de l'obstacle est plus grande que la moitié de 34 mètres, ou 17 mètres.

et Métiers, à Paris. Deux personnes, placées à deux angles opposés de la salle, et tournées vers le mur, peuvent causer entre elles à voix basse, sans que leur conversation soit entendue des personnes qui se trouvent dans l'intervalle ; ce phénomène est dû à la réflexion du son sur les parois de la voûte.

Dans certaines circonstances, il arrive que des obstacles multiples se trouvent disposés de façon à renvoyer un même son plusieurs fois à l'oreille, après plusieurs réflexions successives. Les échos qui se succèdent présentent alors une intensité décroissante, à cause de l'accroissement des distances parcourues par le son (*).

419. Résonance. — Quand on parle dans un appartement de dimensions restreintes, les échos renvoyés par les murs, pour chaque son, reviennent à l'oreille au bout d'un temps inappréciable. Pour chaque son, l'oreille ne distingue donc plus le son lui-même de l'écho qui lui succède, et la parole paraît simplement acquérir *plus d'intensité* qu'à l'air libre.

Il n'en est plus de même dans une salle un peu vaste : chacun des sons produits semble alors se continuer avec les échos qui lui succèdent, et peut même arriver à se confondre avec les sons suivants. — Cet effet, que l'on désigne sous le nom de *résonance*, est tellement manifeste dans certaines salles, que la parole y devient difficilement intelligible ; les syllabes successives se confondent les unes avec les autres, en une sorte de bourdonnement.

On peut atténuer ces effets en disposant, le long des murs, des draperies qui amortissent les vibrations et rendent la salle moins sonore. — Dans nos salles de théâtre, les résonances sont amoindries par tous les détails d'architecture, qui interrompent la régularité des murs ; par les galeries, les colonnades, les balcons en saillie, etc.

(*) On rencontre fréquemment des échos de ce genre dans les pays de montagnes. — On cite, comme l'un des plus remarquables, celui de la villa Simonetta, près de Milan. Un coup de pistolet, tiré de la villa, est répété une quarantaine de fois.

CHAPITRE II

HAUTEUR DES SONS. — INTERVALLES MUSICAUX

I. — APPAREILS DESTINÉS A COMPTER LES VIBRATIONS

420. Sirène. — Nous avons vu déjà (403) qu'un corps sonore, comme nne lame élastique ou une corde tendue, donne un son dont la *hauteur musicale* est d'autant plus grande qu'il se produit un plus grand nombre de vibrations dans un même temps. C'est ce que nous allons vérifier maintenant d'une manière plus précise, au moyen d'appareils qui permettent de *compter* les vibrations effectuées en un temps déterminé. — L'un des premiers appareils qui aient été imaginés pour cet objet est la sirène, dont l'invention est due à Cagniard de Latour.

La *sirène* (*fig.* 265) se compose d'une petite caisse cylindrique HH, dont le fond porte un tube F qui permet de l'adapter sur une soufflerie. La face supérieure de cette caisse est formée par une plaque AA (*fig.* 266), qui est percée d'un certain nombre de trous tels que *a*, distribués sur une circonférence, à égale distance les uns des autres : c'est par ces trous que s'échappera l'air amené dans la caisse par la soufflerie. Au-dessus, et à une très petite distance, se trouve un plateau BB, mobile autour d'un axe vertical D : il est également percé de trous tels que *b*, en même nombre que ceux de la caisse, et distribués exactement de la même manière, en sorte que, lorsqu'un trou du plateau mobile se trouvera en face de l'un des trous de la plaque fixe, tous les autres trous se correspondront en même temps. — Ajoutons enfin que les trous *a* de la plaque fixe sont inclinés dans un certain sens, et les trous *b* du plateau mobile sont inclinés en sens contraire, comme le montre la figure 266 ; dès lors, quand les trous se correspondent, l'air qui sort par les trous inférieurs vient frapper contre les parois des trous supérieurs et, en s'échappant dans l'atmosphère, il communique une impulsion au plateau mobile, dans le sens de la flèche *c*. Ce mouvement du plateau B détruit la coïncidence des deux systèmes de trous, et fait cesser l'échappement de l'air ; mais une nouvelle coïncidence se produit, dès que le plateau B a tourné d'un angle égal à celui qui correspond à l'intervalle de deux trous consécutifs :

l'air, en s'échappant de nouveau, communique une nouvelle impulsion au plateau mobile, en sorte que les périodes d'échappement de l'air deviennent de plus en plus fréquentes.

Lorsque le plateau B a acquis une vitesse suffisante, l'oreille commence à percevoir un son, dont la hauteur musicale s'élève à mesure

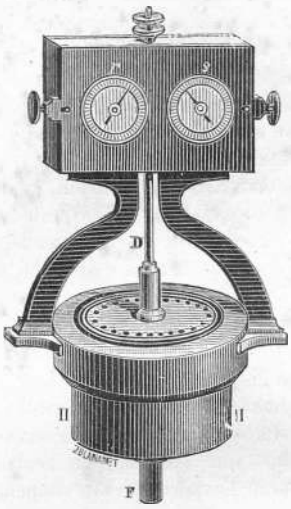


Fig. 265.

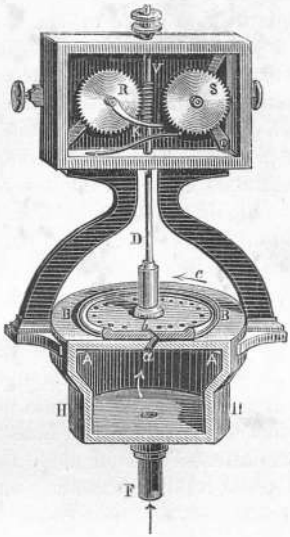


Fig. 266.

Sirène.

que la vitesse augmente. — Pour nous rendre compte des caractères de ce son, considérons, par exemple, une sirène dont la plaque fixe présente 12 trous, et examinons d'abord quel serait l'effet produit *si le plateau mobile n'en avait qu'un seul*. A chaque tour du plateau, ce trou unique viendrait se mettre successivement en coïncidence avec les 12 trous de la plaque fixe : la sortie de l'air serait donc 12 fois établie et interrompue, mais ne s'effectuerait toujours que par une seule ouverture. La succession des impulsions communiquées à l'air extérieur donnerait naissance à un son, dont la *hauteur musicale* dépendrait de la vitesse de rotation du plateau mobile. — Si maintenant le plateau mobile porte 11 autres trous, on voit que, au moment où le trou primitivement considéré établira une coïncidence, tous les autres trous correspondront aussi à des ouvertures de la plaque fixe. Dès lors, la sortie de l'air s'effectuant par les 12 ouvertures à la fois, les impulsions communiquées à l'air extérieur seront plus fortes, c'est-à-dire que *l'intensité* du son sera augmentée, mais il n'y aura toujours que 12 vibrations pour chaque tour du plateau mobile.

Pour permettre de compter les nombres de vibrations qui correspondent aux divers sons, on a pratiqué, à la partie supérieure de l'axe de rotation D, un filet de vis V (*fig.* 266), qui engrène avec une roue dentée R dont la circonférence porte 100 dents. A chaque tour du plateau, cette roue avance d'une dent : ce mouvement est indiqué par une aiguille fixée à la roue et mobile sur un cadran extérieur *r* (*fig.* 265) : chaque division de ce cadran correspond donc à *un tour du plateau*. Une seconde roue S, portant également sur son axe une aiguille qui se meut sur un cadran extérieur *s*, est destinée à compter les *centaines de tours du plateau* : pour cela, on a fixé à l'axe de la roue R un appendice K (*fig.* 266), dont l'extrémité arrive en contact avec une dent de la roue S chaque fois que la roue R a fait un tour entier ; la roue S avance alors d'une dent, et son aiguille marche d'une division. — Enfin il est utile de pouvoir, à volonté, faire engrener la roue R avec la vis V, ou interrompre l'engrenage : pour cela, il suffit de déplacer légèrement, à droite ou à gauche, la plaque verticale qui porte les deux roues, en appuyant sur l'un ou sur l'autre des boutons latéraux que présente cette plaque.

Pour compter le nombre de vibrations d'un son déterminé, on place la sirène sur la soufflerie, l'engrenage n'étant pas établi. Lorsque le son de la sirène est arrivé à la même hauteur que le son à étudier, on établit l'engrenage, et l'on note cet instant sur une montre à secondes. On maintient l'unisson aussi longtemps que possible, en réglant le vent de la soufflerie ; enfin, on termine l'expérience en supprimant l'engrenage, et l'on note encore cet instant. Les nouvelles positions des aiguilles font connaître le nombre de tours effectués par le plateau en un temps connu. — Supposons, par exemple, que l'expérience ait duré 45 secondes ; que l'aiguille des centaines de tours ait parcouru 22 divisions, et l'aiguille des tours 55 divisions. Le plateau aura fait 2 255 tours ; s'il porte 12 trous, il se sera produit un nombre de vibrations égal à 2255×12, ou 26 820. Le nombre de vibrations *en une seconde* sera le quotient de 26 820 par 45, ou 596 (*).

421. Roues dentées. — Les *roues dentées*, imaginées par Savart, peuvent également servir à compter les vibrations.

Ces roues, au nombre de trois ou quatre, sont fixées sur un axe horizontal (*fig.* 267) ; on leur communique un mouvement de rotation au moyen d'une courroie sans fin ACDB, qui passe sur un volant AB

(*) Il est important de remarquer que l'aiguille des tours n'avance d'une division qu'après chaque tour *entier* du plateau, c'est-à-dire après un nombre de vibrations égal au nombre des trous. Le plateau ayant 12 trous, on voit que le nombre des vibrations effectuées pendant *la durée totale* de l'expérience ne pourra être déterminé qu'à 12 unités près. On atténue l'erreur qui en résulte, sur le nombre des vibrations effectuées *en une seconde*, en prolongeant l'expérience aussi longtemps que possible. — La seule difficulté consiste à maintenir le son constant pendant un grand nombre de secondes, ce à quoi l'on arrive en donnant le vent, non pas d'une manière continue, mais par intermittences.

muni d'une manivelle M. Un compteur, semblable à celui de la sirène, fait connaître le nombre de tours effectués par les roues dans un temps donné. — On place une carte sur le support S, de manière que, pendant la rotation, la tranche de cette carte soit rencontrée successivement par les dents de l'une des roues. Les chocs successifs déterminent

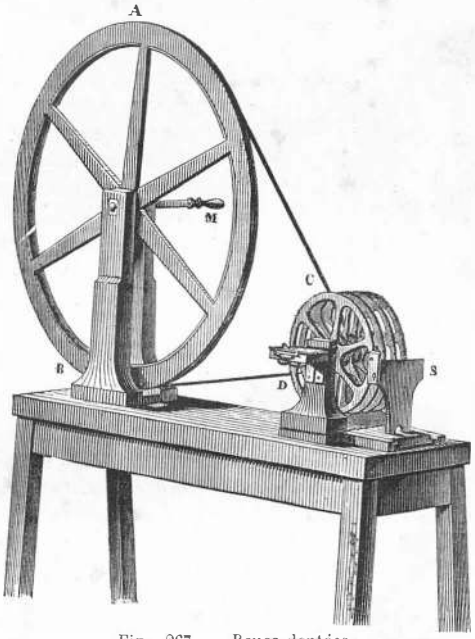


Fig. 267. — Roues dentées.

dans l'air un mouvement vibratoire : le son est d'autant plus aigu que le mouvement de rotation est plus rapide. On règle la rotation de manière que le son reste fixe pendant quelque temps, et l'on opère comme avec la sirène.

422. Compteurs graphiques. — Détermination du rapport des nombres de vibrations qui correspondent à deux sons déterminés. — Les compteurs graphiques sont destinés spécialement à déterminer le *rapport* des nombres de vibrations effectuées, dans un même temps, par deux sons déterminés.

Voici l'une des dispositions les plus simples. Un cylindre EF (*fig.* 268), dont la surface a été couverte de noir de fumée, est porté sur un axe DV, dont la partie supérieure V, travaillée en filet de vis, s'engage dans un écrou pratiqué dans l'une des branches du support. Lorsqu'on fait tourner le cylindre, il s'abaisse, à chaque tour, d'une quantité égale

au pas de la vis. — La figure représente en T une tige métallique, qui est assujettie solidement par l'une de ses extrémités B, et dont l'autre extrémité porte une pointe fine A ; cette pointe vient toucher légèrement la surface du cylindre. Si l'on faisait mouvoir le cylindre seul, la pointe, enlevant le noir de fumée, tracerait une hélice ; si, en même temps, on fait vibrer la tige au moyen d'un archet, l'hélice paraît dentelée : chacune des sinuosités correspond à une vibration de la tige.

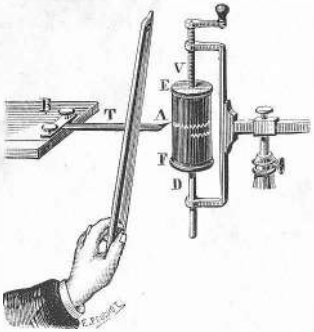


Fig. 268. — Compteur graphique des vibrations.

Disposons maintenant, l'un au-dessous de l'autre, deux corps sonores, de manière qu'ils inscrivent en même temps leurs vibrations sur le cylindre, et supposons d'abord qu'ils donnent des sons *de même hauteur*. Si, une fois l'expérience faite, on trace sur le noir de fumée deux lignes verticales, à une certaine distance l'une de l'autre, on trouve que les deux courbes présentent un même nombre de sinuosités dans l'intervalle de ces deux lignes. On en conclut que les deux corps ont effectué *un même nombre de vibrations* dans le même temps. — Si les deux corps rendent des sons *de hauteurs différentes*, il suffira de compter les sinuosités tracées, par l'un et par l'autre, entre deux verticales déterminées : le quotient de l'un de ces nombres par l'autre exprimera le *rapport* des nombres de vibrations effectuées, dans un même temps, par les deux corps.

Enfin, si l'on connaît le nombre des vibrations effectuées, en une seconde, par l'un des deux corps, cette expérience permettra de déterminer le nombre *absolu* des vibrations effectuées, en une seconde, par l'autre corps. — Supposons, par exemple, que l'on ait inscrit simultanément, sur le cylindre, la courbe produite par une tige et la courbe produite par un diapason ; supposons, en outre, qu'on ait trouvé préalablement, au moyen de la sirène par exemple, que le son du diapason correspond à 435 vibrations par seconde. Si, entre deux verticales déterminées, on trouve que la courbe tracée par la tige présente 20 sinuosités, et que la courbe tracée par le diapason en présente 25, les nombres de vibrations des deux corps, dans un même temps, seront dans le rapport de 20 à 25, ou dans le rapport de 4 à 5. Par suite, le nombre de vibrations de la tige, en une seconde, sera

$$425 \times \frac{4}{5}, \text{ ou } 340 \text{ vibrations.}$$

423 Limites des sons perceptibles. — A mesure que les vibrations deviennent *plus lentes*, le son devient *plus grave*. Mais, si les vibrations sont trop lentes, l'observation montre qu'on n'entend plus qu'une sorte de ronflement, sans caractère musical. — D'après M. Helmholtz, il faut qu'il se produise au moins 20 *vibrations par seconde*, pour que l'oreille perçoive un véritable son.

Inversement, à mesure que les vibrations deviennent *plus rapides*, le son devient *plus aigu*. Mais si les vibrations sont trop rapides, elles ne produisent plus sur l'oreille qu'une sensation presque douloureuse ; pour une rapidité plus grande encore, l'oreille cesse de percevoir aucun son. — D'après M. Kœnig, les nombres de vibrations des sons perceptibles ne dépassent jamais 23 000 *par seconde*. — Ces limites sont d'ailleurs variables d'une personne à une autre.

II. — INTERVALLES MUSICAUX. — GAMME

424. Intervalle de deux sons. — On appelle, en Acoustique, *intervalle de deux sons, le rapport des nombres de vibrations qui leur correspondent, pendant des temps égaux.*

On dit qu'un son est à l'*octave aiguë* d'un autre, lorsqu'il correspond à un nombre de vibrations *double*, dans le même temps. L'intervalle de ces deux sons est alors égal à 2.

Le plus souvent, l'intervalle de deux sons musicaux n'est pas représenté par un nombre entier ; mais, si l'on ramène la valeur numérique de cet intervalle à une expression fractionnaire irréductible, les deux termes de cette expression sont généralement des nombres d'autant plus simples, que la consonance formée par la production *simultanée* des deux sons est plus agréable à l'oreille. — C'est ce que nous allons constater par l'étude des principaux intervalles usités en musique.

425. Gamme. — On donne le nom de *gamme*, à une série de huit sons ou *notes*, dont les deux extrêmes sont à un intervalle d'une octave, et dont les notes intermédiaires sont à des intervalles particuliers, toujours les mêmes pour diverses gammes. — Les notes de la *gamme d'ut* sont désignées par ut_1, *ré*, *mi*, *fa*, *sol*, *la*, *si*, ut_2. — La première note de la gamme est ce qu'on nomme la *tonique*.

Supposons qu'on ait déterminé, par l'une des méthodes précédentes, les nombres de vibrations de chacune des notes de la gamme *d'ut*, et que l'on calcule ensuite, au moyen de ces nombres, l'intervalle qui existe *entre chacune des notes et la tonique*, c'est-à-dire le rapport du nombre de vibrations de chaque note, au nombre de vibrations de la tonique. — On trouve, pour ces rapports, réduits à leur plus simple expression, les résultats suivants :

ut_1	*ré*	*mi*	*fa*	*sol*	*la*	*si*	ut_2
1	$\frac{9}{8}$	$\frac{5}{4}$	$\frac{4}{3}$	$\frac{3}{2}$	$\frac{5}{3}$	$\frac{15}{8}$	2

426. Accord parfait. — De ces divers rapports, le plus simple, après l'octave, est le rapport $\frac{3}{2}$, qui exprime l'intervalle musical entre la cinquième note de la gamme et la tonique ; on l'appelle *intervalle de quinte* (*ut* à *sol*). La production *simultanée* de la tonique *ut* et de la quinte *sol* donne à l'oreille une sensation particulièrement agréable. — Il en est de même du rapport $\frac{5}{4}$, qui exprime l'intervalle entre la tonique et la troisième note de la gamme, ou *intervalle de tierce* (*ut* à *mi*). — La succession de la tonique, de la tierce et de la quinte (*ut*, *mi*, *sol*) constitue ce qu'on appelle un *accord parfait* (*).

427. Intervalles des notes consécutives de la gamme. — Servons-nous maintenant des résultats qui précèdent, pour calculer les intervalles successifs entre *deux notes consécutives* de la gamme d'*ut*. Il suffira, pour cela, de diviser chacune des expressions obtenues par celle qui la précède immédiatement. — Ce calcul est indiqué dans le tableau suivant, avec les noms que les musiciens ont donnés à ces intervalles.

ut_1 à *ré*.	$\frac{9}{8} : 1 = \frac{9}{8}$	ton majeur.
ré à *mi*.	$\frac{5}{4} : \frac{9}{8} = \frac{10}{9}$	ton mineur.
mi à *fa*.	$\frac{4}{3} : \frac{5}{4} = \frac{16}{15}$	demi-ton.
fa à *sol*.	$\frac{3}{2} : \frac{4}{3} = \frac{9}{8}$	ton majeur.
sol à *la*.	$\frac{5}{3} : \frac{3}{2} = \frac{10}{9}$	ton mineur.
la à *si*	$\frac{15}{8} : \frac{5}{3} = \frac{9}{8}$	ton majeur.
si à ut_2.	$2 : \frac{15}{8} = \frac{16}{15}$	demi-ton.

Sans nous arrêter à la distinction entre les tons majeurs et les tons

(*) La gamme tout entière peut être considérée comme dérivant de l'accord parfait. En effet, il est aisé de voir que, en partant de la note *ut*, une succession de trois accords parfaits permet de retrouver toutes les notes de la gamme.

Et d'abord, l'accord parfait qui a pour tonique *ut* fournit les trois notes *ut*, *mi*, *sol*, dont les nombres de vibrations sont 1, $\frac{4}{3}$, $\frac{3}{2}$.

Si maintenant on forme un accord parfait dont la tonique soit la dernière note de l'accord d'*ut*, c'est-à-dire la note *sol*, on obtient, comme nombre de vibrations de la seconde note de ce nouvel accord, $\frac{3}{2} \times \frac{5}{4} = \frac{15}{8}$; c'est la note *si*. Quant à la troisième note de ce même accord, elle aura comme nombre de vibrations $\frac{3}{2} \times \frac{3}{2} = \frac{9}{4}$; il suffit d'en prendre la moitié, c'est-à-dire l'octave grave, pour obtenir le nombre $\frac{9}{8}$, qui correspond au *ré* de la gamme.

Si enfin on forme un accord parfait dont la dernière note soit la note *ut*, on aura, pour la tonique de ce nouvel accord, le nombre de vibrations 1 divisé par $\frac{3}{2}$, c'est-à-dire $\frac{2}{3}$; il suffit d'en prendre le double, c'est-à-dire l'octave aiguë, pour obtenir le nombre $\frac{4}{3}$ qui correspond au *fa* de la gamme. Pour la seconde note de ce même accord, on aura le nombre $\frac{2}{3} \times \frac{5}{4} = \frac{5}{6}$, dont il suffit encore de prendre l'octave aiguë pour obtenir le nombre $\frac{5}{3}$, qui correspond au *la* de la gamme. — On retrouve donc ainsi toutes les notes de la gamme d'*ut*.

mineurs, nous dirons que les intervalles offerts par les notes consécutives de la gamme d'*ut* forment une série comprenant *deux tons, suivis d'un demi-ton,* et *trois tons, suivis d'un demi-ton* (*).

Après avoir formé une première gamme d'*ut*, commençant par ut_1 et finissant par ut_2, on peut en former une seconde, commençant par ut_2 et finissant par ut_3; chacune des notes de cette seconde gamme sera l'octave aiguë de la note correspondante de la première. On en formera de même une troisième, et ainsi de suite, ce qui donnera une échelle musicale, formée par une série de *gammes d'ut* (**).

Mais on peut aussi se proposer de former d'autres gammes, ayant pour toniques des notes autres que *ut*. — Nous allons voir que pour conserver, dans ces nouvelles gammes, les mêmes intervalles que dans la gamme d'*ut*, il est nécessaire de substituer, à certaines notes de l'échelle précédente, des notes un peu différentes, qui prendront le nom de *dièses* ou de *bémols*.

428. Dièses. — En partant des notes fournies par les gammes d'*ut*, proposons-nous de former une *gamme de sol*, c'est-à-dire une gamme ayant pour tonique la note *sol*, qui était la quinte dans la gamme d'*ut*. — Si l'on conservait, dans cette nouvelle gamme, les notes précédemment obtenues, *sol, la, si, ut, ré, mi, fa,* sol_2, le sixième intervalle (*mi* à *fa*), qui doit être d'un ton ($\frac{9}{8}$), ne serait que d'un demi-ton ($\frac{16}{15}$); il est donc nécessaire de substituer, à la note *fa*, une note plus élevée. On emploie une note dont le nombre de vibrations s'obtient en multipliant celui de *fa* par $\frac{25}{24}$; cette note prend le nom de *fa dièse*, et s'indique par *fa* $\sharp$. — En même temps, cette substitution rend le septième intervalle (*fa* $\sharp$ à sol_2) égal à un demi-ton, comme il doit être.

En partant maintenant des notes fournies par les gammes de *sol*, cherchons à former une *gamme de ré*, c'est-à-dire une gamme ayant pour tonique la note *ré*, qui était la quinte dans la gamme de *sol*. — Si

(*) L'expression $\frac{10}{9}$ qui représente le ton mineur, est très peu différente de l'expression $\frac{9}{8}$, qui représente le ton majeur, car le rapport de ces deux expressions est $\frac{80}{81}$. Il ne diffère donc de l'unité que de $\frac{1}{81}$; c'est un intervalle qui est difficilement appréciable à l'oreille, et qui a reçu le nom de *comma*.

(**) La sensation produite sur l'oreille par la *succession* de plusieurs notes dépend des *rapports* que présentent entre eux leurs nombres de vibrations, et non pas des *valeurs absolues* de chacun de ces nombres. — C'est ce que l'on constate, d'une manière très simple, pour l'accord parfait en particulier, au moyen des roues dentées (*fig.* 267). Prenons trois roues dentées, montées sur le même axe, et choisies de manière que les nombres de dents de ces trois roues soient dans les rapports de 1 à $\frac{5}{4}$ et à $\frac{3}{2}$. Si on leur donne une vitesse de rotation uniforme, et qu'on présente successivement une carte à chacune d'elles, on constate que les trois notes obtenues forment un accord parfait. — Si l'on change la vitesse de rotation, et qu'on recommence l'expérience, on obtient trois nouvelles notes, ayant des hauteurs différentes des précédentes, mais formant encore un accord parfait. — Or, dans ces expériences successives, les *valeurs absolues* des nombres de vibrations ont été modifiées, mais les *rapports* de ces nombres entre eux sont restés les mêmes.

l'on conservait les notes telles qu'on vient de les obtenir, *ré*, *mi*, *fa* ♯, *sol*, *la*, *si*, *ut*, *ré*$_2$, le sixième intervalle ne serait encore que d'un demi-ton. En substituant à la note *ut* la note *ut* ♯, on rend au sixième et au septième intervalle les valeurs qu'ils doivent avoir. — La gamme de *ré*, ainsi obtenue, comprend alors deux notes *diésées*; et ainsi de suite.

En général, *pour passer d'une gamme quelconque à celle qui aura sa tonique à une quinte au-dessus de la première, il suffit de reproduire les notes fournies par celle-ci, en diésant l'avant-dernière note, ou* note sensible, *de la nouvelle gamme.*

429. Bémols. — Des considérations analogues conduisent à l'introduction des *bémols*. — Partons encore des notes fournies par les gammes d'*ut*, et proposons-nous de former une gamme ayant sa tonique à une quinte *au-dessous d'ut*, c'est-à-dire une *gamme de fa*. Avec les notes *fa*, *sol*, *la*, *si*, *ut*, *ré*, *mi*, *fa*$_2$, le troisième intervalle (*la* à *si*), qui devrait être d'un demi-ton, est d'un ton; le quatrième intervalle, qui est d'un ton, n'est que d'un demi-ton. On rendra à ces deux intervalles les valeurs qu'ils doivent avoir, en substituant à la note *si* une note plus basse, dont on obtiendra le nombre de vibrations en multipliant celui de *si* par $\frac{24}{25}$: cette nouvelle note prend le nom de *si bémol*, et s'indique par *si* ♭.

En partant de même de cette gamme de *fa*, pour former une gamme ayant sa tonique à une quinte au-dessous de *fa*, c'est-à-dire une *gamme de si* ♭, on sera conduit à substituer, à la note *mi*, une note plus basse, c'est-à-dire *mi bémol*. Cette nouvelle gamme contiendra alors deux notes *bémolisées*; et ainsi de suite.

En général, *pour passer d'une gamme à celle qui aura sa tonique à une quinte au-dessous de celle de la première, il suffit de reproduire les notes fournies par celle-ci, en bémolisant la quatrième note de la nouvelle gamme* (celle qui est à une quinte au-dessous de l'octave).

430. Gamme tempérée. — Par ce qui précède, on voit que, dans l'intervalle d'une seule octave, devraient se placer 21 sons différents, savoir : les sept notes de la gamme d'*ut*, leurs dièses et leurs bémols. Si l'on voulait réaliser, dans plusieurs octaves successives, toutes ces notes sur des instruments à sons fixes, tels que l'orgue, le piano, on compliquerait à la fois la construction et le jeu de l'instrument. Cette considération a conduit les musiciens à l'idée du *tempérament.*

On divise l'intervalle d'octave en 12 demi-tons *moyens*, égaux entre eux, et constituant la succession des notes naturelles, avec leurs dièses et leurs bémols (*). — Une note *diésée* se confond alors avec la note

(*) La valeur du *demi-ton moyen* est déterminée par cette condition que, dans une octave, le produit de ces douze intervalles égaux doit être égal à 2. La valeur du demi-ton moyen est donc représentée par $\sqrt[12]{2}$ ou 1,060. — En comparant les notes ainsi obtenues avec celles que fournissaient les nombres précédents, il est facile de voir que les notes de la gamme tempérée n'en diffèrent que de quantités très petites

suivante *bémolisée* (ainsi l'*ut dièse* se confond avec le *ré bémol*; le *ré dièse* se confond avec le *mi bémol*, etc.). Les tons entiers, majeurs et mineurs, sont remplacés eux-mêmes par un intervalle décomposable en deux demi-tons moyens.

431. Nombres absolus de vibrations des notes employées en musique. — Diapason normal. — Jusqu'ici nous n'avons considéré que les *rapports* des nombres de vibrations des diverses notes de l'échelle musicale; dans la pratique, il est nécessaire, pour accorder entre eux les divers instruments, de fixer le nombre *absolu* des vibrations de l'une de ces notes, ce qui fixera en même temps les nombres de vibrations de toutes les autres.

D'après les conventions adoptées en France, l'*ut* le plus grave du violoncelle correspond à un nombre de vibrations, par seconde, représenté par 65,25. On le désigne par ut_1, et l'on affecte de l'indice 1 toutes les notes comprises entre ut_1 et son octave aiguë : dans l'octave suivante, les notes sont affectées de l'indice 2; dans la troisième octave, de l'indice 3, etc. Au-dessous de ut_1, on emploie, d'octave en octave, les indices — 1, — 2.

Pour accorder les instruments, on se sert d'un *diapason* (*fig.* 253), qui rend un son déterminé de l'échelle musicale. — Le diapason normal donne la note la_3, qui correspond à 435 vibrations par seconde (*).

(*) Ces vibrations sont des *vibrations doubles*, formées chacune d'une allée et d'une venue du corps sonore (402). Les auteurs qui entendent, par le mot de vibrations, des *vibrations simples*, formées chacune d'une allée ou d'une venue, donnent alors à la note la_3 un nombre de vibrations égal à 870 par seconde.

CHAPITRE III

VIBRATIONS DES GAZ. — TUYAUX SONORES

432. Les sons produits par les tuyaux sonores sont dus aux vibrations du gaz intérieur. — On donne le nom général de *tuyaux sonores*, à des tuyaux dont on fait usage dans les orgues et que l'on met en vibration en y amenant un courant d'air au moyen d'une soufflerie. — La soufflerie se compose d'un soufflet S (*fig.* 271), que l'on met en mouvement au moyen de la pédale P, et qui comprime l'air dans la caisse ou *sommier* AB. La face supérieure de cette caisse est percée d'un certain nombre de trous, qu'on peut ouvrir à volonté en pressant sur les touches *t,t,t...*, de manière à amener le vent dans tel ou tel tuyau.

Fig. 269.

Fig. 270.

Tuyau à bouche.

Les tuyaux sonores se distinguent en *tuyaux à bouche* et *tuyaux à anche*. — Dans les *tuyaux à bouche*, le vent arrive par le *pied p* (*fig.* 269 et 270), traverse la fente *l* qu'on nomme la *lumière*, et vient frapper contre le biseau *b* qui constitue la *lèvre supérieure*. Les vibrations de la lèvre *b* se communiquent à l'air du tuyau, et déterminent, dans la colonne d'air intérieure, des vibrations intenses, en raison de la combinaison des mouvements dus à plusieurs systèmes d'ondes sonores, comme on le verra plus loin (*).

Pour constater le mouvement vibratoire de l'air intérieur, on place, sur la soufflerie, un tuyau T (*fig.* 272), ouvert à sa partie supérieure et dont l'une des faces est en verre. — Si l'on fait parler ce tuyau et qu'on y introduise, à l'aide d'un fil de soie, une membrane de baudruche, tendue sur un anneau rigide S et couverte de sable fin, on voit le sable s'agiter, et cela dans chacune des

(*) L'expérience montre que la nature des parois du tuyau ne modifie pas la hauteur du son, au moins lorsque ces parois sont suffisamment épaisses; elle n'a guère d'autre influence que de donner au son un *timbre* ou un autre, selon qu'elles sont en métal ou en bois. — Dans ce qui va suivre, nous supposerons qu'on n'ait à considérer que les vibrations de l'air intérieur.

positions successives que l'on donne à la membrane dans la colonne d'air, sauf en certains points particuliers, que nous indiquerons plus loin. Cette colonne est donc le siège d'un mouvement vibratoire.

On distingue les tuyaux à bouche en *tuyaux ouverts* et *tuyaux fermés*, selon que l'extrémité opposée à la bouche est ouverte, ou fermée par

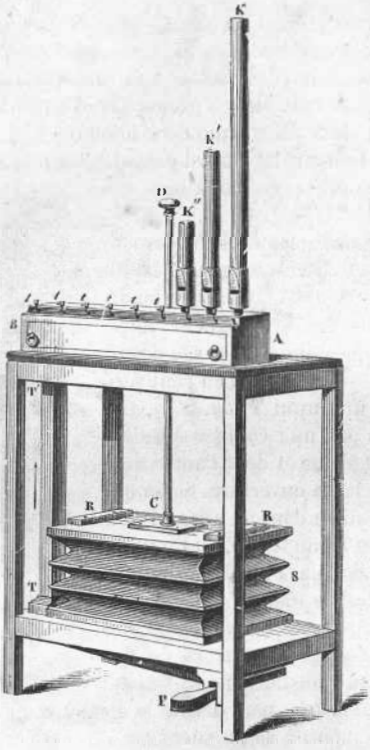


Fig. 271. — Soufflerie.

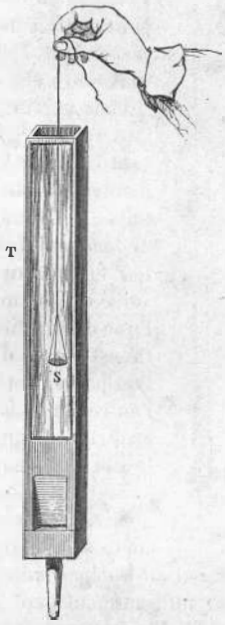


Fig. 272

une paroi solide. — Cette distinction est essentielle à faire, pour l'étude des lois que nous allons indiquer.

433. Loi des longueurs. — En plaçant un tuyau sur une soufflerie, et en amenant d'abord faiblement le vent, on lui fait rendre un son de hauteur déterminée; si l'on appuie ensuite graduellement avec la main sur le soufflet, par l'intermédiaire de la tige DC (*fig.* 271), de manière à rendre le courant d'air de plus en plus rapide, on produit une série de sons, de plus en plus élevés. Le premier de tous ces sons, c'est-à-dire le plus grave, est ce qu'on nomme le *son fondamental*; les sui-

vants sont les *harmoniques successifs* du tuyau. — L'expérience est particulièrement facile à faire avec un tuyau étroit T (*fig.* 273), dont le pied est muni d'un robinet R : en ouvrant progressivement le robinet, en même temps qu'on appuie sur la tige de la soufflerie, on obtient aisément cinq ou six harmoniques successifs.

Fig. 273.

Si maintenant on adapte sur la soufflerie plusieurs tuyaux *ouverts, de diverses longueurs* (*fig.* 271), on constate que *les hauteurs de leurs sons fondamentaux sont en raison inverse des longueurs.* — Ainsi, par exemple, en prenant trois tuyaux dont les longueurs soient entre elles comme les nombres 1, $\frac{4}{5}$, $\frac{2}{3}$, on obtient trois notes formant un accord parfait, c'est-à-dire correspondant à des nombres de vibrations qui sont entre eux comme 1, $\frac{5}{4}$, $\frac{3}{2}$.

Pour les tuyaux *fermés,* les sons fondamentaux varient également avec la longueur, et suivant la même loi. — Seulement, le son fondamental d'un tuyau fermé, de longueur déterminée, est le même que celui d'un tuyau ouvert de *longueur double.* — C'est ce qu'on peut vérifier en employant un tuyau T (*fig.* 274), traversé en son milieu par une coulisse AS, dont l'une des moitiés est pleine et dont l'autre moitié est percée d'une large ouverture. Selon que l'on pousse cette coulisse dans un sens ou dans l'autre, on obtient un tuyau fermé, ou un tuyau ouvert de longueur double. Dans les deux cas, le son fondamental est le même.

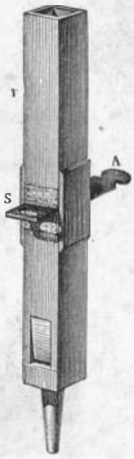


Fig. 274.

Enfin, si l'on adapte sur la soufflerie plusieurs tuyaux de même longueur et de diamètres différents, on constate que *la hauteur du son est indépendante du diamètre,* pourvu que le diamètre du tuyau soit suffisamment petit par rapport à sa longueur.

434. Production des nœuds fixes et des ventres fixes, dans les tuyaux sonores. — Si l'on assimile le mouvement vibratoire produit par l'air dans un tuyau, au mouvement que produisent les vibrations d'une lame mobile, il résulte de ce que nous avons vu (413) que ce mouvement doit donner naissance à une série d'ondes, formées chacune d'une demi-onde condensée et d'une demi-onde dilatée, et se propageant de la bouche vers l'extrémité opposée. — Or, si l'on considère d'abord un tuyau *fermé,* chacun des éléments de ces ondes, à mesure qu'il arrive sur le fond du tuyau, éprouve une réflexion : de là, la production d'ondes réfléchies, marchant en sens inverse, c'est-à-dire du fond vers la bouche du tuyau. Ces deux mouvements se propagent

indépendamment l'un de l'autre, comme deux systèmes d'ondulations se propagent à la surface d'une eau tranquille et se traversent sans se troubler. Chaque tranche d'air du tuyau est donc animée, à chaque instant, d'une vitesse d'ébranlement qui est *la résultante de deux autres*, savoir : celle qui lui serait communiquée par l'onde directe seule, et celle qui lui serait communiquée par l'onde réfléchie : cette vitesse résultante est égale à la *somme* des vitesses composantes, quand celles-ci sont de même sens ; elle est égale à leur *différence*, quand elles sont de sens contraires. — De même, la compression ou la dilatation d'une tranche quelconque, à chaque instant, est la résultante des compressions ou des dilatations que chacune des deux ondes y déterminerait si elle se produisait seule.

En tenant compte de la superposition de ces effets, la théorie montre qu'il se forme dans le tuyau :

1° Des *nœuds fixes*, c'est-à-dire des tranches, de position invariable, où la vitesse vibratoire est constamment nulle, mais où la compression ou la dilatation est plus grande que dans toute autre tranche voisine, au même instant ;

2° Des *ventres fixes*, c'est-à-dire des tranches où la vitesse vibratoire est plus grande que celle de toutes les tranches voisines, au même instant, mais où il n'existe, à aucun instant, ni compression, ni dilatation.

Semblablement, dans un tuyau *ouvert*, chacune des ondes directes, en arrivant à l'extrémité du tuyau, éprouve une réflexion sur l'atmosphère extérieure, et donne naissance à une onde réfléchie, se propageant en sens inverse. — Mais les positions des nœuds et des ventres, par rapport à l'extrémité du tuyau, ne sont pas les mêmes que dans les tuyaux fermés. Cette différence tient à ce que, dans un tuyau *fermé*, une demi-onde directe condensée, en se réfléchissant sur le fond, donne naissance à une demi-onde réfléchie condensée ; tandis que, à l'extrémité d'un tuyau *ouvert*, une demi-onde directe *condensée* donne naissance à une demi-onde réfléchie *dilatée*, et réciproquement.

Nous nous contenterons de vérifier, par quelques expériences, la production des nœuds et des ventres fixes, et d'en déterminer la position.

435. Vérifications expérimentales. — L'expérience qui a été indiquée plus haut, et qui consiste à introduire successivement en divers points d'un tuyau une membrane couverte de sable (*fig.* 272), suffit pour constater la production de nœuds et de ventres fixes. Dans les nœuds, la membrane n'accuse aucun mouvement vibratoire ; dans les ventres, elle accuse un mouvement vibratoire dont l'amplitude est plus grande que dans tous les points voisins. — On trouve ainsi, par exemple, que, dans un tuyau ouvert, rendant le son fondamental, il se produit un seul nœud, situé au milieu du tuyau, et un ventre à chacune des extrémités. — Si l'on passe ensuite du son fondamental à des har-

moniques de plus en plus élevés, le nombre des nœuds et des ventres augmente, suivant une loi qui sera indiquée plus loin.

La position des ventres peut d'ailleurs se déterminer avec plus de précision, au moyen de cette autre propriété que, dans les *ventres*, il ne se produit ni compression ni dilatation de l'air intérieur. Prenons un tuyau prismatique de bois (*fig.* 275), présentant dans l'une de ses faces une série de petites ouvertures transversales, v', v, n'..., que l'on peut ouvrir ou fermer à volonté au moyen de petites plaques de bois, mobiles à coulisse. — En faisant rendre au tuyau l'un de ses harmoniques, on constate que l'on peut démasquer certaines de ces ouvertures v, v', sans que le son soit modifié. Les tranches d'air correspondantes sont précisément celles où se forment des *ventres*, pour l'harmonique dont il s'agit : il est clair, en effet, qu'il ne s'y produit ni compression ni dilatation, puisqu'on peut mettre ces points en communication avec l'air extérieur sans altérer le son.

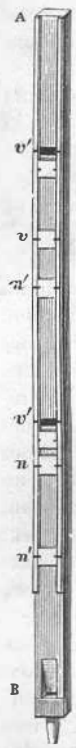


Fig. 275. Nœuds et ventres de vibrations.

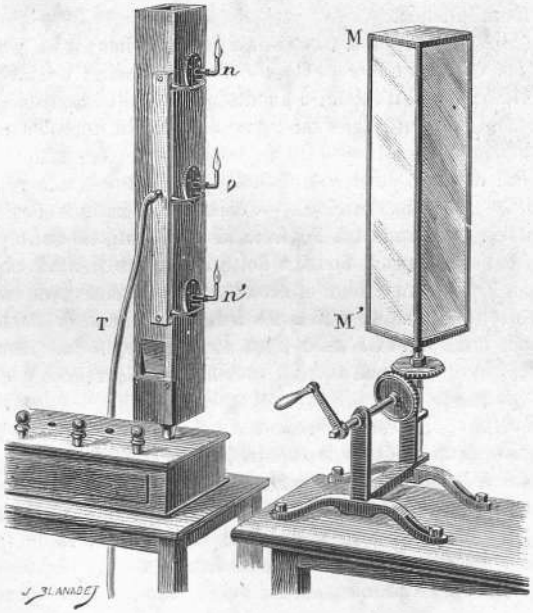


Fig. 276. — Expérience de Kœnig

Pour vérifier que, dans les *nœuds*, il se produit une succession de compressions et de dilatations plus grandes que dans les autres points, on peut employer la disposition suivante, qui est due à M. Kœnig. —

Dans la paroi d'un tuyau de bois (*fig.* 276), on a assujetti de petites capsules qui ont la forme de petites boîtes plates, limitées du côté de l'extérieur par une plaque de bois, et du côté de l'intérieur par une membrane de caoutchouc. On y fait arriver du gaz d'éclairage par un tuyau latéral T, et on allume le gaz à l'extrémité des petits becs n, v, n', qui correspondent à chacune des capsules. — Tant que le tuyau ne parle pas, toutes les flammes restent immobiles. Dès qu'on met le tuyau en vibration, certaines de ces flammes s'allongent et se raccourcissent périodiquement; ce sont celles qui correspondent à des *nœuds* : en ces points, les compressions et les dilatations périodiques de l'air intérieur se transmettent au gaz de la capsule, par la membrane de caoutchouc, et font ainsi varier la longueur de la flamme (*). — Ces oscillations de la flamme sont d'ailleurs trop rapides pour être facilement perceptibles, quand on regarde les flammes directement. On dispose alors, en regard du tuyau, un miroir MM', qui a la forme d'un prisme quadrangulaire, et dont l'axe est parallèle à celui du tuyau. En faisant tourner ce miroir autour de son axe, au moyen d'une manivelle et d'un système de roues dentées, on aperçoit une succession d'images de la flamme (*fig.* 277), disposées les unes à la suite des autres comme des

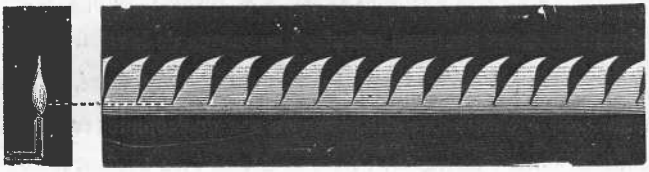


Fig. 277.

dents de scie : chacune de ces dents indique une période d'allongement de la flamme. — Au contraire, les flammes qui correspondent à des ventres demeurent immobiles; elles donnent, dans le miroir tournant, une image qui a l'aspect d'une bande lumineuse de largeur uniforme (**).

436. Positions des nœuds et des ventres. — Une étude attentive de ces phénomènes montre que, pour un harmonique quelconque, les nœuds et les ventres *alternent entre eux*, c'est-à-dire que deux nœuds

(*) Lorsque le courant de gaz est réglé de manière que les flammes soient très petites, la vibration a pour effet d'éteindre brusquement celles qui correspondent à des nœuds.

(**) Le tuyau représenté par la figure 276, qui est un tuyau *ouvert*, porte trois capsules, situées au *premier quart*, au *second quart*, et au *troisième quart* de sa longueur. Lorsqu'on fait rendre à ce tuyau son premier harmonique, c'est-à-dire celui qui est immédiatement au-dessus du son fondamental, l'observation des flammes montre que la tranche du milieu v correspond à un ventre, et que les tranches n et n_1 correspondent à des nœuds. — Ce résultat particulier rentre, comme on va le voir, dans la loi générale qui sera indiquée plus loin.

consécutifs sont toujours séparés par un ventre; et deux ventres consécutifs, par un nœud. — En outre, les nœuds et les ventres successifs sont, dans toute la longueur du tuyau, *à égale distance les uns des autres*. Ils sont en nombre d'autant plus grand que l'harmonique est d'un ordre plus élevé.

Dans un tuyau *fermé*, le fond correspond toujours à un nœud, puisque la tranche d'air qui est en contact avec le fond ne peut subir aucun déplacement. La bouche du tuyau correspond toujours à un ventre, puisque la tranche d'air qui s'y trouve communique avec l'atmosphère et doit être, à chaque instant, à la pression extérieure.

Dans un tuyau *ouvert*, les deux extrémités correspondent à des ventres, puisqu'elles sont l'une et l'autre en communication avec l'atmosphère.

437. Distance de deux nœuds consécutifs, ou de deux ventres consécutifs. — Prenons un tuyau quelconque, ouvert ou fermé; faisons-lui rendre l'un de ses harmoniques, et déterminons la distance d d'un nœud au ventre qui le suit. Déterminons, d'autre part, avec la sirène par exemple, le nombre n de vibrations, dans l'unité de temps, pour le son dont il s'agit. Si l'on désigne par λ la longueur de l'onde sonore qui correspond à ce son, et par v la vitesse de propagation du son dans l'air, nous pourrons calculer λ au moyen de la relation $\lambda = \frac{v}{n}$.

Or, quel que soit le son sur lequel on ait fait porter l'expérience, on trouve toujours $d = \frac{\lambda}{4}$, c'est-à-dire que, pour un son quelconque rendu par le tuyau, la distance d'un nœud au ventre qui le suit est le *quart de la longueur d'onde* qui correspond à ce son.

Ce résultat d'expérience, qui s'applique à un harmonique quelconque, va nous permettre de déterminer *a priori* les lois des harmoniques, pour chaque espèce de tuyaux.

438. Lois des harmoniques des tuyaux. — 1° *Tuyaux fermés.* — Soit n (*fig.* 278) le fond du tuyau, qui correspond à un nœud; soit v'' la bouche, qui correspond à un ventre. D'après ce qu'on vient de voir, les nœuds et les ventres intermédiaires, pour un harmonique déterminé, diviseront toujours la longueur nv'' en un nombre *impair* de parties, égales *au quart de la longueur d'onde* de cet harmonique. Si donc on désigne par L la longueur du tuyau, par $2p + 1$ le nombre de ses subdivisions, et par λ la longueur de l'onde correspondante, on aura

$$(1) \qquad L = (2p + 1)\frac{\lambda}{4}.$$

Si $p = 0$, c'est-à-dire s'il n'y a ni nœud ni ventre entre la bouche et le fond du tuyau, le tuyau rend le *son fondamental*, et l'on a $\lambda = 4L$,

c'est-à-dire que *la longueur d'onde qui correspond au son fondamental d'un tuyau fermé est égale à 4 fois la longueur de ce tuyau.*

Si, dans la relation (1), on remplace la longueur d'onde λ par sa valeur $\frac{v}{n}$, il vient $L = (2p+1)\frac{v}{4n}$; d'où

$$n = (2p+1)\frac{v}{4L}.$$

Fig. 278.

Pour avoir les nombres de vibrations du son fondamental et des harmoniques successifs du tuyau, on devra, dans cette formule, donner successivement à p toutes les valeurs entières, 0,1,2,3,... La quantité $2p+1$ devient alors successivement égale aux nombres impairs 1,3,5,7....; et comme $\frac{v}{4L}$ est constant, on est conduit à la loi suivante : *Les nombres des vibrations qui correspondent au son fondamental et aux harmoniques successifs d'un tuyau fermé varient comme les nombres impairs consécutifs.* — C'est ce que vérifie l'expérience, par la détermination des intervalles musicaux entre le son fondamental et les harmoniques successifs du tuyau.

Fig. 279.

2° *Tuyaux ouverts.* — Soit v (*fig.* 279) l'extrémité ouverte du tuyau, qui correspond à un ventre; soit v''' la bouche, qui correspond également à un ventre. Pour un harmonique quelconque, les nœuds et les ventres intermédiaires diviseront toujours la longueur vv''' en un nombre *pair* de parties, égales au quart de la longueur d'onde de cet harmonique; on aura donc

$$L' = 2p'\frac{\lambda}{4} = p'\frac{\lambda}{2}, \qquad (2)$$

L' étant la longueur du tuyau et $2p'$ le nombre de ses subdivisions. Si, dans cette relation (2), on remplace λ par $\frac{v}{n}$, il vient $L' = p'\frac{v}{2n}$; d'où :

$$n = p'\frac{v}{2L'}.$$

Pour avoir les nombres de vibrations du son fondamental et des harmoniques successifs du tuyau, on devra donner à p' les valeurs 1,2,3,4...; ce qui conduit aux deux résultats suivants : *Dans un tuyau ouvert, la longueur d'onde du son fondamental est double de la longueur du tuyau. — Les nombres de vibrations du son fondamental et des divers harmoniques varient comme les nombres entiers consécutifs.* — C'est ce que l'expérience vérifie, par la détermination des intervalles musicaux entre

le son fondamental et les harmoniques successifs d'un tuyau ouvert (*).

439. Détermination de la vitesse du son dans les gaz, au moyen des tuyaux sonores. — Supposons qu'on fasse rendre à un tuyau sonore, ouvert ou fermé, un harmonique d'un certain ordre, et qu'on détermine, par l'expérience, la distance D qui sépare deux nœuds consécutifs. La longueur de l'onde correspondante étant égale à 2D, si l'on désigne par n le nombre de vibrations par seconde, et par v la vitesse de propagation du son dans l'air, on aura

$$v = 2Dn. \qquad (1)$$

Faisons parler le même tuyau avec un gaz autre que l'air, et amenons-le à donner l'harmonique *de même ordre*, caractérisé par la même distance D de deux nœuds consécutifs; si n' est le nombre de vibrations, et v' la vitesse du son dans ce gaz, on aura

$$v' = 2Dn'. \qquad (2)$$

De ces égalités (1) et (2), on tire $\frac{v'}{v} = \frac{n'}{n}$, ou $v' = v \times \frac{n'}{n}$; la vitesse v dans l'air étantsupposée connue par des expériences directes (411), on en déduira la vitesse v'. — Dulong a mesuré par cette méthode les vitesses du son dans un certain nombre de gaz.

440. Vitesse du son dans les liquides. — On peut déterminer d'une manière semblable la vitesse du son dans un liquide, dans l'eau par exemple. Un tuyau étant plongé complètement dans l'eau, on le fait parler en y amenant un courant d'eau, et on détermine le nombre de vibrations n' qui correspond à un harmonique déterminé; puis, le nombre de vibrations n qui correspond au même harmonique lorsque le tuyau vibre dans l'air. On a encore : $v' = v \times \frac{n'}{n}$, ce qui donne la valeur de la vitesse de propagation v' dans l'eau, connaissant la vitesse v dans l'air. — Wertheim a appliqué cette méthode à un certain nombre de liquides : elle est évidemment plus générale que la méthode de détermination directe qui avait été appliquée à l'eau par Sturm et Colladon (412).

441 Tuyaux à anche. — Outre les *tuyaux à bouche*, on emploie encore, dans les orgues, des *tuyaux à anche*, dans lesquels le mode d'ébranlement de l'air est différent.

(*) Ces formules comprennent également les lois auxquelles sont soumis les sons *fondamentaux*, pour des *tuyaux de longueurs différentes* (435).

En effet, pour un tuyau *fermé*, on a, en faisant $p = 0$ dans la formule qui donne la valeur générale de n, et désignant par n_1 le nombre de vibrations du son fondamental :

$$n_1 = \frac{v}{4L};$$

ce qui montre que le nombre de vibrations de ce son est inversement proportionnel à la longueur du tuyau.

De même, pour un tuyau *ouvert*, en faisant $p' = 1$, on a, pour le son fondamental,

$$n'_1 = \frac{v}{2L'},$$

ce qui donne encore la même loi. — Enfin, pour que n'_1 soit égal à n_1, il suffit que L' soit égal à 2L, ce qui conduit à ce résultat déjà énoncé (433) : le son fondamental d'un tuyau fermé est le même que celui d'un tuyau ouvert *de longueur double*.

Une *anche* est une petite lame élastique, fixée par une de ses extrémités, et mise en vibration par un courant d'air. — Dans les tuyaux employés pour la construction des orgues, l'anche se place ordinairement à la partie supérieure. — On distingue les anches en *anches battantes* et *anches libres*.

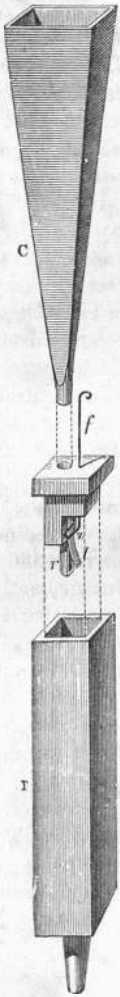


Fig. 280. — Tuyau à anche battante.

Dans l'*anche battante* (*fig.* 280), la lame élastique *l* vient s'appliquer sur les bords d'une petite rigole *r*, fermée à sa partie inférieure par une petite cloison horizontale. L'air amené dans le tuyau T ne peut s'échapper qu'en soulevant la lame *l*; celle-ci revient, en vertu de son élasticité, pour se soulever de nouveau, et ainsi de suite. Elle accomplit donc une série de vibrations, en frappant à chaque fois les bords de la rigole; il en résulte un son, dont la hauteur dépend de la longueur de la partie vibrante ou *languette*. On règle cette longueur au moyen de la *rasette*, formée par un fil de fer replié *f*, qui appuie en *z* sur la languette. — Le son que rend l'anche battante est généralement éclatant et nasillard ; on le rend plus agréable en fixant, au-dessus de l'extrémité du tuyau, un *cornet d'harmonie* C, dont l'air entre en vibration en même temps que l'anche.

L'*anche libre* (*fig.* 281) présente une disposition analogue; mais la languette *l* ne touche pas les bords de l'ouverture par laquelle s'échappe l'air : elle oscille librement, des deux côtés du plan de cette ouverture, et produit ainsi des sons moins stridents. On l'emploie peu dans les grandes orgues, mais elle figure exclusivement dans l'harmonium et dans l'orgue expressif.

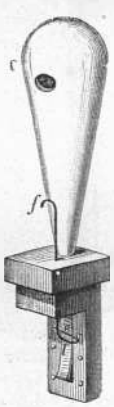


Fig. 281. Anche libre.

Les grandes orgues présentent plusieurs *jeux de tuyaux*, soit *à bouche*, soit *à anches*, destinés à produire des effets variés. L'exécutant amène à volonté le vent de la soufflerie dans tel ou tel jeu, en faisant mouvoir des *registres*, c'est-à-dire des plaques percées de trous, qui dégagent ou interceptent les ouvertures des tuyaux.

442. Instruments à vent. — Les différents instruments à vent se rattachent à l'un ou à l'autre type de tuyaux sonores que nous venons d'indiquer.

Le *flageolet* (*fig.* 282) présente une embouchure E que l'exécutant

place entre ses lèvres, et qui est semblable à celle des *tuyaux à bouche*. Le courant d'air vient se briser sur un biseau B, placé sur le côté de l'instrument. Le tuyau est percé d'un certain nombre de trous, *m*, *n*, *p*, *q*, *r*, sur lesquels l'exécutant place les extrémités des doigts. — Lorsque tous les trous sont bouchés, le son produit est le son fondamental du tuyau ou l'un de ses harmoniques, selon que le courant d'air est plus ou moins fort. En débouchant tel ou tel trou, l'exécutant transforme l'instrument en un tuyau de longueur moindre, et modifie ainsi la hauteur des sons obtenus.

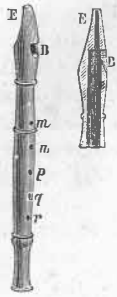


Fig. 282. Flageolet.

Dans la *flûte*, l'ébranlement de l'air se produit encore d'une manière semblable ; l'embouchure est un trou ovale, pratiqué sur le côté du tuyau et ayant ses bords taillés en biseau. L'exécutant place ses lèvres au-dessus de cette ouverture, à une petite distance.

Fig. 283. Clarinette.

Dans la *clarinette* (*fig.* 283), l'embouchure est absolument différente : c'est une *embouchure à anche*. L'anche est formée par une petite lame de roseau C, adaptée à un bec de buis B, de manière à ne laisser qu'un passage étroit entre elle et le bec lui-même. — Cette embouchure étant placée entre les lèvres de l'exécutant, le courant d'air met l'anche en vibration : ce sont les lèvres qui jouent le rôle de la *rasette*, c'est-à-dire qu'elles déterminent la longueur de la partie vibrante de l'anche, en appuyant plus ou moins fortement sur sa surface. Dans la longueur du tuyau, sont distribués des trous que l'on peut ouvrir ou fermer à volonté, soit directement avec l'extrémité des doigts, soit au moyen de clefs, pour les trous plus éloignés. — Le *hautbois* et le *basson* présentent une disposition semblable, avec cette différence que l'embouchure est formée de deux lames de roseau, appliquées l'une contre l'autre par leurs bords.

Fig. 284. Embouchures de cor.

Enfin, le cor, la trompette, l'ophicléide et les instruments de cuivre en général diffèrent encore des précédents par leur embouchure, qui a reçu le nom d'*embouchure de cor*. Elle est formée par une sorte d'entonnoir, ou par une cavité hémisphérique (*fig.* 284), qu'on applique contre les lèvres légèrement écartées l'une de l'autre. Les lèvres elles-mêmes jouent alors le rôle de véritables anches : le passage de l'air leur communique un mouvement vibratoire, dont la rapidité dépend à

la fois de la force du vent, et de l'énergie avec laquelle l'exécutant serre la bouche contre l'ouverture. C'est la combinaison de ces deux efforts qui rend si difficile, au moins dans les commencements, l'étude de ces instruments.

Le *cor* (*fig.* 285) est formé par un tuyau contourné en spirale TT, et terminé par une partie évasée P qu'on appelle le *pavillon*. Il ne peut donner que le son fondamental et ses divers harmoniques. On peut cependant lui faire rendre quelques-unes des notes intermédiaires, en bouchant d'une manière plus ou moins complète, avec la main fermée, l'ouverture du pavillon; mais les sons ainsi obtenus sont toujours plus ou moins sourds, il est même difficile de leur donner toujours une justesse satisfaisante.

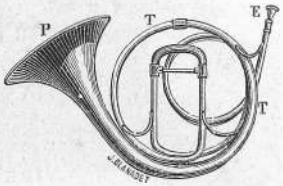


Fig. 285. — Cor d'harmonie.

L'*ophicléide* présente, dans sa longueur, un certain nombre de trous qu'on peut ouvrir à volonté au moyen de *clefs*, de manière à multiplier beaucoup les sons que peut rendre l'instrument. — On trouve une disposition semblable dans les *saxophones*, dont on fait usage dans la musique militaire (*).

Dans le *trombone*, une partie mobile à coulisse permet d'allonger ou de raccourcir brusquement le tuyau sonore, et de produire ainsi des sons plus ou moins élevés. — Dans le *cornet à pistons*, l'exécutant modifie la longueur du tuyau au moyen de pistons qui interceptent ou font entrer dans la partie vibrante diverses portions supplémentaires.

(*) Cette dénomination est empruntée au nom du fabricant, M. Sax, qui en a, le premier, montré toutes les ressources.

CHAPITRE IV

VIBRATIONS DES CORPS SOLIDES

I. — VIBRATIONS DES CORDES.

443. Lois des vibrations transversales. — Lorsqu'une corde est tendue entre deux points fixes, on peut lui faire produire des sons en la faisant vibrer soit transversalement, soit longitudinalement. — Nous étudierons d'abord les vibrations *transversales*, qui sont les plus importantes au point de vue des applications.

On produit les vibrations transversales en pinçant la corde, c'est-à-dire en l'écartant de sa position d'équilibre, pour l'abandonner ensuite à elle-même, ou bien en la frottant avec un archet perpendiculairement à sa longueur. — Dans l'un ou l'autre cas, chacun de ses points exécute une série de vibrations perpendiculairement à la direction primitive de la corde.

Les nombres des vibrations, pour des cordes différentes, varient :

1° *En raison inverse des longueurs* ;

2° *En raison inverse des diamètres* ;

3° *Proportionnellement aux racines carrées des poids tenseurs* ;

4° *En raison inverse des racines carrées des densités.*

Ces quatre lois sont comprises dans la formule suivante, qui est due à Lagrange : Si l'on désigne par n le nombre des vibrations en une seconde, on a, pour une corde quelconque,

$$n = \frac{1}{2rl}\sqrt{\frac{gP}{\pi d}};$$

r est le rayon et l la longueur de la corde; d est sa densité et P est la masse dont le poids tend la corde; g est l'accélération due à la pesanteur (toutes ces grandeurs doivent être exprimées avec des unités appartenant au même système) ; enfin π est le rapport de la circonférence au diamètre, égal à 3,1416 (*).

(*) Proposons-nous, par exemple, de trouver le nombre de vibrations d'une corde de fer, ayant 1 mètre de longueur, 2 dixièmes de millimètre de rayon, et tendue par

444. Vérifications expérimentales des lois précédentes, à l'aide du sonomètre. — Le *sonomètre* (*fig.* 286) se compose d'une caisse en bois

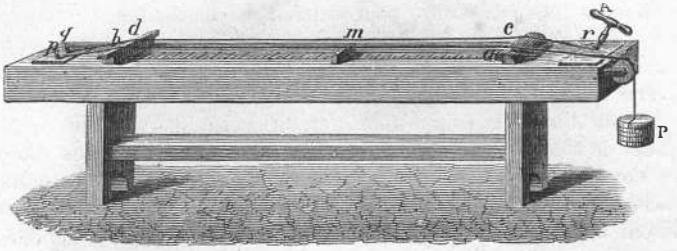


Fig. 286. — Sonomètre.

de sapin, qui porte deux chevalets fixes, *ac*, *bd*, à une distance d'un mètre. Sur ces chevalets s'appuie une première corde métallique *dc*, tendue entre les chevilles *q* et *r* : la clef Λ permet de régler à volonté la tension de cette corde et, par suite, le son qu'elle rend. Λ la cheville *p* est assujettie une seconde corde métallique *ba*, qui, s'appuyant sur les chevalets, vient passer sur une poulie et soutient en P un poids. — Un petit chevalet mobile *m*, qu'on placera au-dessous de cette dernière corde, permettra de limiter à volonté la longueur de la partie vibrante : on mesurera cette longueur au moyen d'une règle fixée sur la caisse et divisée en millimètres.

1° Pour vérifier la *loi des longueurs*, commençons par tendre la corde antérieure *ba* au moyen d'un poids déterminé P, et réglons ensuite tension de la corde postérieure *dc*, à l'aide de la clef Λ, de manière que les sons produits par les deux cordes soient *à l'unisson*. — Plaçons alors le chevalet mobile *m* au milieu de la corde antérieure et comparons le son qu'elle produit à celui qu'elle rendait précédemment, c'est-à-dire à celui que rend toujours la corde postérieure. On constate que ce son est l'*octave aiguë* du premier. En d'autres termes, en réduisant la longueur de la corde à *moitié*, on obtient un nombre de vibrations *double* (425). — En limitant de même, sur la corde antérieure, au moyen du chevalet mobile, une longueur égale aux $\frac{2}{3}$ de sa longueur

un poids de 10 kilogrammes. Si l'on fait usage des unités C.G.S., on exprimera l et r en centimètres, P en grammes, on prendra $g = 981$, et $d = 7{,}8$. On aura alors

$$n = \frac{1}{2 \times 0{,}02 \times 100}\sqrt{\frac{10000 \times 981}{5{,}1416 \times 7{,}8}} = 158{,}2.$$

Ce nombre de vibrations correspond à un son compris entre ut_2 et ut_3; et si l'on divise 158,2 par le nombre de vibrations de ut_2, savoir 150,5, on trouve 1,212, résultat très peu différent de 1 200 ou $\frac{4}{5} : \frac{25}{24}$, qui mesure l'intervalle de *ut* à *mib*. La note donnée par la corde se confond donc à peu près avec le mib_2.

totale, et comparant le nouveau son qu'elle produit à celui que continue à rendre la corde postérieure, on trouve que le nouveau son est la *quinte* du premier ; dès lors, d'après ce que nous avons vu (425), le nombre des vibrations, pour cette nouvelle longueur, est égal aux $\frac{3}{2}$ du nombre de vibrations primitif. — *En général*, quand on fait varier la longueur d'une corde, *le nombre des vibrations varie en raison inverse de la longueur de la partie vibrante.*

2° Pour vérifier la *loi des diamètres*, on choisit, par exemple, quatre cordes de même matière, dont les diamètres soient entre eux comme les nombres 4, 3, 2, 1. On place la première en *ba*, avec un certain poids tenseur P, et on met la corde fixe *dc* à l'unisson avec elle, au moyen de la clef A. On remplace alors successivement la première corde par les trois autres, en employant toujours le même poids tenseur P, et l'on compare les sons qu'elles rendent avec celui de la corde fixe. — On trouve que les quatre sons peuvent être représentés par les notes

$$ut_1 \qquad fa_1 \qquad ut_2 \qquad ut_3,$$

dont les nombres de vibrations sont entre eux comme 1, $\frac{4}{3}$, 2, 4, ou comme

$$\frac{1}{4} \quad \frac{1}{3} \quad \frac{1}{2} \quad 1.$$

Ces nombres de vibrations sont donc *en raison inverse des diamètres.*

3° La *loi des tensions* se vérifie d'une manière analogue. La corde *ba* étant chargée d'un certain poids, on met *dc* à l'unisson avec elle. Puis on charge la corde *ba* de poids égaux à 4, 9, 16 fois le poids primitif. Si le premier son obtenu est ut_1, on trouve, pour les suivants :

Poids tenseurs.	1	4	9	16
Sons rendus par la corde.	ut_1	ut_2	sol_2	ut_3
Nombres de vibrations.	1	2	3	4

ce qui démontre que les nombres de vibrations sont *proportionnels aux racines carrées des poids tenseurs.*

4° Enfin, pour la *loi des densités*, on peut faire usage de deux cordes de même diamètre, l'une de platine et l'autre de fer, et constater que, sous l'action de poids égaux, des longueurs égales de ces deux cordes produisent des sons dont l'intervalle est *en raison inverse des racines carrées des densités*, c'est-à-dire sensiblement égal à $\sqrt{\frac{7,8}{25}}$.

445. Harmoniques des cordes. — Lorsque, sur un sonomètre, on attaque une corde AB (*fig.* 287) dans le voisinage de son milieu M, le gonflement apparent que cette corde éprouve pour l'œil, montre que *tous ses points* entrent en vibrations. Le point M prend le nom de *ventre de vibration*, et l'on appelle *nœuds* les extrémités A et B qui, seules, ne vibrent pas.

Si maintenant on presse légèrement avec le doigt sur le milieu M′ de la corde, et si l'on attaque avec l'archet l'une des moitiés, A′M′ par

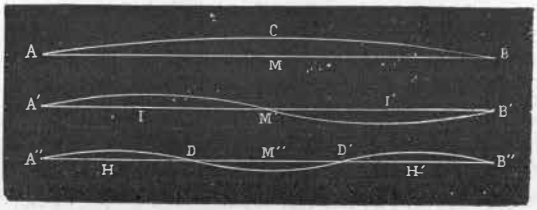


Fig. 287.

exemple, on obtient un son qu'on reconnaît pour l'*octave aiguë* du son fondamental, et qui, par conséquent, correspond à un nombre *double* de vibrations. Or, le milieu M′ de la corde, maintenu par la pression du doigt, ne pouvant entrer en vibration, devient un *nœud* ; mais la seconde moitié M′B′ entre en vibration, en même temps que A′M′. En effet, si l'on place de petits chevrons de papier sur différents points de M′B′, ces chevrons sont renversés, dès qu'on attaque, avec l'archet, un point de A′M′. La corde s'est donc divisée en deux parties, qui vibrent séparément comme le feraient deux cordes de longueur moitié moindre (*).

De même, si l'on presse avec le doigt sur le point D, et si l'on attaque avec l'archet un point de A″D, on obtient un son qui est la quinte de l'octave du son fondamental, qui, par suite, correspond à un nombre triple de vibrations. — En plaçant des chevrons de papier sur différents points de DB″, on constate encore que tous ces chevrons se renversent, à l'exception de celui qui est placé en D′. Le point D′ est donc un *nœud*, aussi bien que le point D, et la corde s'est subdivisée en trois parties égales, vibrant chacune séparément.

En généralisant ces résultats, on est conduit à cette loi : *Les nombres de vibrations du son fondamental et des harmoniques d'une même corde, vibrant transversalement, varient comme les nombres entiers successifs.*

446. Notions générales sur les instruments à cordes. — Les instruments à cordes qu'on emploie en musique sont tous fondés sur les lois des vibrations transversales. — Les uns, comme le piano et la

(*) L'expérience suivante, due à Duhamel, montre d'ailleurs que les deux moitiés de la corde vibrent en sens contraire, c'est-à-dire que, tandis que A′M′ s'infléchit d'un côté de la position d'équilibre, M′B′ s'infléchit de l'autre côté, comme le représente la figure. La corde étant légèrement appuyée par son milieu sur un chevalet, si on l'attaque en même temps des deux côtés de ce point, avec deux archets mis en mouvement *dans le même sens*, on n'obtient aucun son, tandis qu'on obtient l'octave du son fondamental quand on fait mouvoir les deux archets *en sens contraire*.

harpe, sont des instruments *à sons fixes*, et exigent au moins autant de cordes qu'ils doivent produire de notes différentes. — Les autres, comme le violon, le violoncelle, sont des instruments *à sons variables*, et comprennent un nombre de cordes bien moins considérable.

Dans le *piano*, les vibrations sont produites par le choc de petits marteaux garnis de peau, dont chacun correspond à une des touches du clavier. A mesure que l'on abandonne les touches, elles laissent retomber, sur les cordes correspondantes, de petits *étouffoirs* qui éteignent les vibrations. — Au moyen de la *pédale*, on peut éloigner à volonté tous les étouffoirs : les vibrations des cordes ébranlées se prolongent alors beaucoup plus longtemps.

La *harpe* établit le passage entre les instruments à sons fixes et les instruments à sons variables. Les cordes, qu'on fait vibrer en les pinçant avec les doigts, correspondent aux notes naturelles de la gamme : à l'aide des pédales, on peut modifier légèrement les longueurs des parties vibrantes, de manière à obtenir les dièses et les bémols.

Dans le *violon*, le *violoncelle*, la *contrebasse*, chaque corde peut produire un grand nombre de sons, suivant la longueur que l'exécutant laisse à la partie vibrante, en appuyant avec les doigts de la main gauche sur tel ou tel point de la corde ; la main droite fait mouvoir l'archet. — Dans ces trois instruments, les vibrations se communiquent à la face supérieure de la caisse ; de celle-ci, à la face inférieure, soit par les côtés, soit à l'aide d'une pièce intermédiaire qu'on appelle l'*âme* ; enfin, des deux faces, à l'air intérieur. Toutes ces vibrations simultanées produisent un renforcement du son : le mérite de l'instrument dépend surtout de l'égalité avec laquelle le renforcement s'opère pour les sons de diverses hauteurs ; il est subordonné à la qualité des bois et à la disposition relative des parties.

447. Vibrations longitudinales des cordes. — Pour faire vibrer longitudinalement une corde, on la frotte, dans le sens de sa longueur, avec un morceau de drap imprégné de colophane.

La formule suivante donne le nombre de vibrations n' du son fondamental ; on a :

$$n' = \frac{v'}{2l}.$$

l, étant la longueur de la corde, et v' la vitesse de propagation du son dans la substance dont est faite la corde.

Cette formule est identique à celle qui donne le nombre de vibrations dans un tuyau ouvert (note de la page 344). Le mouvement vibratoire longitudinal d'une corde est donc comparable au mouvement vibratoire de l'air d'un tuyau ouvert. On doit remarquer seulement que, tandis qu'un tuyau ouvert présente deux *ventres* à ses extrémités, une corde vibrant longitudinalement présente deux *nœuds* à ses extrémités.

Si la corde est faite d'un métal élastique, comme l'acier, dans lequel la vitesse du son v' est très grande, le son produit par ses vibrations longitudinales doit être très aigu. — C'est ce que l'expérience confirme.

Enfin, le nombres de vibrations qui correspondent au son fondamental et aux harmoniques successifs sont, comme pour les tuyaux ouverts, représentés par la série des nombres entiers successifs.

II. — VIBRATIONS DES VERGES, DES PLAQUES, ETC.

448. Vibrations transversales des verges. — Diapason. — Les verges, ou tiges rigides, se distinguent des cordes en ce qu'elles ont, par elles-mêmes, une forme déterminée, et qu'on peut les mettre en vibration sans leur appliquer de poids tenseur.

Pour des verges prismatiques *semblablement assujetties* (*), l'expérience montre que les nombres de vibrations *transversales* qui correspondent au son fondamental sont *inversement proportionnels aux carrés des longueurs*, et *directement proportionnels aux épaisseurs*. On entend ici par *épaisseur*, celle des deux dimensions transversales qui est parallèle au plan dans lequel s'effectuent les vibrations. — Le nombre des vibrations est indépendant de la *largeur*, c'est-à-dire de la dimension perpendiculaire à ce plan.

Pour vérifier ces lois, dans le cas où la verge est encastrée à l'une de ses extrémités et libre à l'autre, on prend une verge AB (*fig.* 254), dont on fixe un point C dans un étau : on la fait vibrer en la frottant avec un archet perpendiculairement à sa longueur.

Le *diapason* est une verge d'acier, courbée en forme de fourche, que l'on fait vibrer transversalement, soit à l'aide d'un archet, soit en frappant l'une des branches contre un corps dur, soit enfin en introduisant de force un petit cylindre de bois ou de métal entre les deux branches (*fig.* 255), et le faisant sortir vivement par l'extrémité libre de la fourche. — On emploie le diapason pour accorder les instruments : le diapason *normal* donne, comme on l'a vu (451), la note la_3 qui correspond à 435 vibrations par seconde.

449. Vibrations longitudinales des verges. — On produit les vibrations *longitudinales* des verges, en les frottant dans le sens de la longueur avec les doigts imprégnés de colophane (*fig.* 288), ou avec un morceau de drap

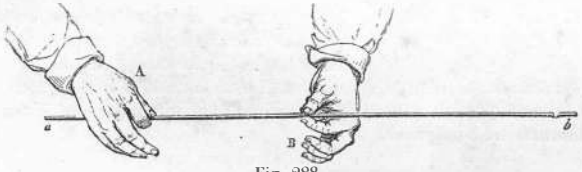


Fig. 288.

mouillé. — Si la verge est fixée en son milieu K (*fig.* 289) et que l'extrémité A s'appuie contre une bi d'ivoire C suspendue à un fil FC, on constate que la bille est vivement projetée, par la vibration même, dans le sens de l'axe. — Les sons obtenus sont remarquables par leur douceur et leur pureté.

(*) Les divers modes d'*assujettissement* consistent, soit à encastrer la verge à l'une de ses extrémités, en la laissant libre à l'autre; soit à l'encastrer à ses deux extrémités; soit à l'appuyer par une de ses extrémités contre un plan fixe, etc. — Lorsqu'on assujettit successivement une même verge de diverses manières, le son fondamental varie avec le mode d'assujettissement.

Il est particulièrement intéressant de signaler les rapprochements que présentent les lois de ces vibrations, soit avec celles des tuyaux fermés, soit avec celles des tuyaux ouverts, selon que l'une des extrémités de la verge est fixée, ou que les deux extrémités sont libres :

1° *Une extrémité de la verge est fixée, et l'autre est libre.* — Quel que soit le son produit, l'extrémité fixée correspond toujours à un nœud; l'extrémité libre correspond à un ventre. Les lois sont les mêmes que celles des *tuyaux fermés* (438, 1°). — Pour une même verge, les nombres de vibrations du son fondamental et des harmoniques successifs varient *comme les nombres impairs consécutifs.* — Pour des verges de même nature et de longueurs différentes, les nombres de vibrations des sons fondamentaux *sont inversement proportionnels aux longueurs.*

2° *Les deux extrémités sont libres.* — Pour maintenir la verge, on la fixe par son milieu (*fig.* 288 ou 289); le point fixe devient un nœud de vibration.

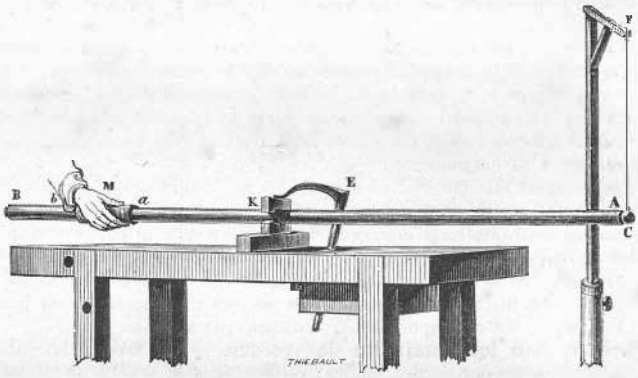


Fig. 289. — Vibrations longitudinales des verges élastiques.

tandis que les extrémités sont des ventres. Les lois sont les mêmes que pour les *tuyaux ouverts* (438, 2°). — Pour une même verge, les nombres de vibrations du son fondamental et des divers harmoniques varient *comme les nombres entiers successifs.* — Pour des verges de même nature et de longueurs différentes, les nombres de vibrations des sons fondamentaux sont *inversement proportionnels aux longueurs.*

450. Vibrations des plaques. — Lignes nodales. — Une plaque métallique circulaire (*fig.* 290) étant fixée sur un pied, par son centre de figure, faisons-la vibrer en frottant avec l'archet l'un des points de son contour, et en appuyant fortement le doigt sur un autre point : selon que ces deux points occuperont telle ou telle position, on obtiendra un son ou un autre. — Si, dans chaque cas, on couvre de sable fin la surface de la plaque, on voit le sable prendre des mouvements rapides, qui le portent vers certaines lignes où il s'accumule Ces *lignes nodales* partagent la plaque en un certain nombre de parties, qui vibrent

séparément comme le font les diverses parties d'une corde donnant un de ses harmoniques (*).

Mais, tandis qu'une corde peut vibrer transversalement sans qu'il se produise de nœuds entre ses extrémités, une plaque présente toujours des lignes nodales, même quand elle donne le son le plus grave qu'on puisse lui faire rendre.

L'expérience montre que, pour une même plaque, *la production d'une même figure nodale est toujours accompagnée du même son.* —

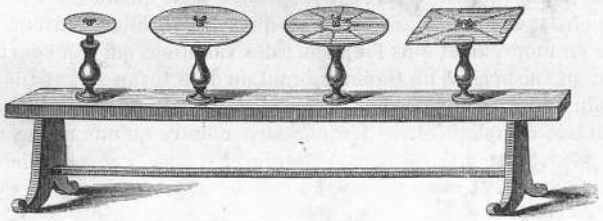


Fig. 290. — Vibrations des plaques. Lignes nodales.

Mais la réciproque n'est pas vraie : *un même son peut correspondre à des dispositions différentes des lignes nodales.*

451. Timbres et cloches. — Les timbres, les cloches, les tam-tams, etc., se subdivisent, comme les plaques, en parties vibrantes,

(*) Cette comparaison peut se poursuivre plus loin encore. Lorsqu'une corde se divise en deux ou plusieurs parties vibrantes, séparées par des nœuds, les vibrations sont de sens contraire dans deux segments consécutifs (*Note* de la page 351) ; il en est de même pour les plaques. — Supposons qu'on fasse rendre à une plaque circulaire un son correspondant à un système de 4 lignes nodales diamétrales (*fig.* 291) : la plaque sera divisée en 8 secteurs égaux. Si deux secteurs contigus, tels que A et B, vibrent en sens inverse, c'est-à-dire si l'un d'eux s'infléchit au-dessous du plan primitif de la plaque au moment où l'autre se courbe au-dessus de ce plan, ils enverront à l'oreille, à chaque instant, des vitesses de sens contraires ; en d'autres termes, le son dû aux vibrations des secteurs A, A', A'', A''' et le son dû aux vibrations des secteurs B, B', B'', B''' se détruiront en partie. Pour le vérifier, Lissajous a eu l'idée de fixer, un peu au-dessus de la plaque, un carton formé de quatre secteurs *a*, *a'*, *a''*, *a'''*, qui correspondent aux parties A, A', A'', A''' ; il suffit, pour cela, de placer le cône creux O' sur le pivot O. Le carton arrête les vibrations déterminées dans l'air par les secteurs A, et ne laisse arriver à l'oreille que les mouvements concordants déterminés par les secteurs B : on constate que l'on entend alors un son *beaucoup plus intense*.

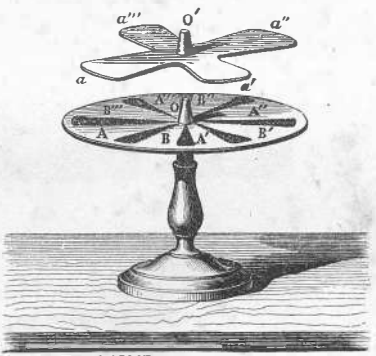


Fig. 291. — Expérience de Lissajous.

séparées par des lignes nodales. — On peut le démontrer en mettant de l'eau dans un verre à pied, et en attaquant avec un archet l'un des points du bord du verre : on voit la surface de l'eau se partager en un certain nombre de parties, dans lesquelles le liquide éprouve une vive agitation; entre ces parties, se trouvent des lignes de repos, où le liquide reste immobile.

452. Vibrations des membranes. — Les membranes flexibles, comme les peaux que l'on tend sur les tambours, les feuilles de papier collées sur des cadres de bois, rendent des sons quand on les frappe ou qu'on les ébranle d'une manière quelconque. Elles peuvent aussi entrer en mouvement sous l'influence des vibrations qui leur sont transmises, au voisinage d'un timbre vibrant ou d'un tuyau sonore : le sable répandu à leur surface accuse la formation de lignes nodales, généralement très compliquées. — L'expérience montre qu'une même membrane peut, avec une tension déterminée, rendre une série de sons, assez nombreux et assez voisins les uns des autres pour qu'on puisse, dans la pratique, considérer la membrane comme capable de vibrer à l'unisson de tous les sons qui ne s'écartent pas trop du son fondamental. — Lorsqu'on fait varier la tension, on modifie à la fois le son fondamental et toute la série des sons que la membrane peut rendre.

Ces propriétés trouvent leur application dans la perception des sons. Sous l'action des ondes sonores recueillies par le pavillon de l'oreille, la *membrane du tympan* entre en vibration; son mouvement se communique, soit par la chaîne des *osselets*, soit par l'air de l'*oreille moyenne*, aux membranes de la *fenêtre ronde* et de la *fenêtre ovale*, l'une et l'autre en contact avec le liquide qui remplit l'*oreille interne;* on conçoit donc que les ramifications du nerf acoustique, qui s'épanouissent à l'intérieur de ce liquide, entrent elles-mêmes en vibration, et transmettent à l'encéphale l'impression sonore.

CHAPITRE V

TIMBRES DES SONS

453. Sons composés. — Causes générales du timbre. — Lorsqu'on écoute avec attention le son rendu par une corde de piano ou par une corde de violon, vibrant dans toute sa longueur, on entend généralement, en même temps que le son fondamental, un ou plusieurs de ses harmoniques : en d'autres termes, la sensation perçue par l'oreille est celle d'un *son composé*.

Pour se rendre compte de ce phénomène, il suffit de répéter l'expérience sur la corde d'un sonomètre : il n'est pas difficile de constater que la corde, tout en exécutant ses mouvements de totalité, se subdivise en un certain nombre de parties, dont les mouvements propres se superposent au mouvement d'ensemble. — Lorsque, par exemple, la corde donne *simultanément* les sons 1 et 2, elle vibre tout d'une pièce comme la corde AB (*fig.* 292) et produit ainsi le son fondamental ; mais,

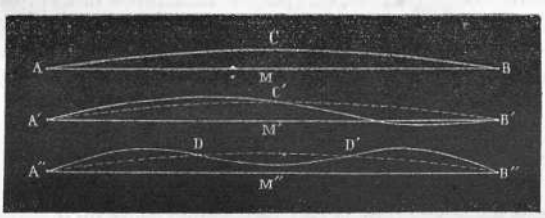


Fig. 292.

en même temps, elle se partage en deux parties A'C', C'B', dont chacune vibre en même temps comme une corde de longueur moitié moindre ces deux mouvements simultanés sont représentés sur la corde A'B'. — De même, quand on entend à la fois les sons 1 et 3, la corde se subdivise, comme A''B'', en trois parties égales, qui exécutent trois vibrations pendant que la corde tout entière en fait une seule (*).

(*) Les mouvements vibratoires sont toujours de sens contraire dans deux segments consécutifs de la corde ; on le démontrerait en répétant, sur une corde entièrement libre entre ses extrémités, l'expérience de Duhamel (*Note* de la page 351). — Par là s'explique l'observation suivante, faite par Delezenne. Quand on attaque une corde

Dans ces divers cas, l'impression dominante est celle du son fondamental; mais l'oreille attribue, à chacun de ces sons de même hauteur, un caractère spécial, une sorte de *timbre* particulier, résultant de la superposition de tel ou tel harmonique avec le son fondamental.

C'est l'extension de ces remarques qui a conduit M. Helmholtz à considérer les caractères de timbre, qui distinguent entre eux les sons de divers instruments, comme dus à des causes de cette nature. — La méthode qu'il a employée pour manifester, dans un son complexe, l'existence des harmoniques, est fondée sur le phénomène du *renforcement des sons*.

454. Renforcement des sons. — Voici une expérience qu'il est facile de répéter. On se place auprès d'un piano, on éloigne les étouffoirs en appuyant sur la pédale, et on fait entendre, avec un violon ou avec la voix, une note déterminée : on constate que, parmi les cordes du piano, celles qui peuvent rendre, soit cette note, soit l'un de ses harmoniques, entrent en vibration; le son acquiert ainsi pour l'oreille un *renforcement* remarquable. — Or, dans cette expérience, la transmission du mouvement s'est effectuée par l'air, mais elle n'a pas mis en vibration toutes les cordes du piano. Donc, pour qu'un son se transmette à des corps voisins et leur fasse jouer le rôle de renforçants, il faut qu'il y ait, entre ce son et ceux que ces corps peuvent rendre, certains rapports déterminés, les rapports d'un son à ses harmoniques.

Quand un corps sonore est en contact avec les parois d'une cavité contenant de l'air, cet air peut entrer en vibration et résonner comme un tuyau sonore, à la condition que les dimensions de la cavité soient convenables. — C'est le principe des *caisses sonores*, qui entrent dans la construction des instruments à cordes. — C'est ce qui conduit aussi à placer les diapasons sur des caisses rectangulaires de bois (*fig.* 293), dont les dimensions dépendent du son rendu par le diapason lui-même. Le diapason étant mis en vibration, on constate, en le plaçant sur la caisse, que le son acquiert une intensité beaucoup plus grande. Au moment où les vibrations du diapason commencent à s'éteindre, la caisse peut encore rendre le son perceptible, alors qu'il serait impossible de l'entendre sans ce renforcement.

exactement en son milieu, on n'obtient aucun son; c'est que l'archet imprime aux points situés de part et d'autre du milieu, et très près de ce point, des vitesses de même sens : ces vitesses ne peuvent se concilier avec la production de l'harmonique 2. — Marloye a généralisé la remarque de Delezenne, en montrant qu'on ne peut pas non plus faire vibrer transversalement une corde en l'attaquant exactement au tiers, au quart, au cinquième de sa longueur. — On conçoit, d'après ces remarques, que le rang des harmoniques qui se produisent en même temps que le son fondamental dépend de la position particulière du point où la corde est attaquée. C'est pour cette raison que, dans le piano, les marteaux sont disposés de manière à frapper chacune des cordes exactement au *septième* de sa longueur. L'harmonique qui correspondrait à la division de la corde en sept parties égales produirait, avec le son fondamental, une *dissonance* : grâce à cette disposition, cet harmonique ne peut se produire. La production simultanée des autres harmoniques contribue, au contraire, à rendre le son plus agréable à l'oreille.

Voici encore une expérience destinée à montrer que les colonnes d'air

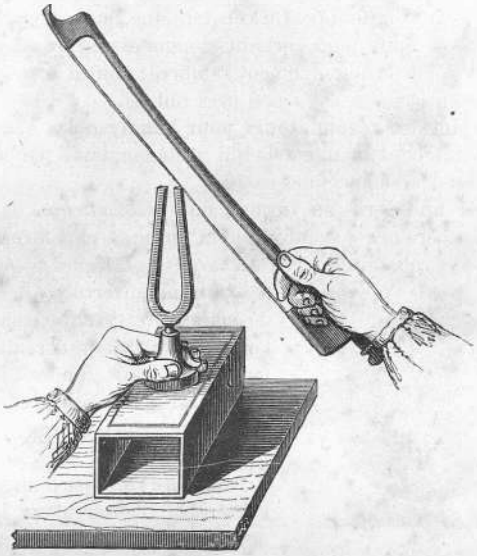


Fig. 293. — Diapason avec caisse sonore.

doivent offrir des dimensions déterminées, pour renforcer un son de

Fig. 294. — Timbre avec tuyau renforçant.

telle ou telle hauteur. — On fait vibrer un timbre de bronze T (*fig.* 294) au moyen d'un archet. On en approche l'ouverture d'un tuyau A,

fermé à son autre extrémité par un piston que l'on fait mouvoir avec la main, de manière à donner des longueurs variables à la partie du tuyau qui regarde le timbre. On constate que, pour certaines positions du piston, c'est-à-dire pour certaines longueurs du tuyau, le son rendu par le timbre est considérablement renforcé; pour d'autres positions du piston, le renforcement est à peu près nul (*).

455. Emploi des résonnateurs pour l'analyse des sons composés. — Voici maintenant la méthode qui a été employée par M. Helmholtz, pour analyser les sons composés.

On prend une série de tuyaux, dits *résonnateurs*, de dimensions diverses. L'expérience a montré que la forme la plus favorable, pour le but qu'on se propose, est celle de cavités *sphériques* S (*fig.* 295), présentant une ouverture AB, et, à l'opposé de cette ouverture, un conduit MN que l'on introduit dans l'oreille. Dans cette forme de tuyaux sonores, le son *fondamental* est le seul qui prenne nettement naissance : c'est ce que nous appellerons le *son propre* du résonnateur.

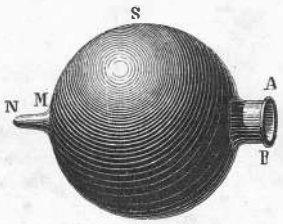


Fig. 295. — Résonnateur.

Pour faire l'analyse d'un son produit à l'extérieur, l'observateur bouche l'une de ses oreilles; dans son autre oreille, il introduit, l'un après l'autre, les conduits de divers résonnateurs, de dimensions telles que leurs sons propres correspondent à diverses notes de l'échelle musicale. A chaque expérience, les sons qui diffèrent du son propre du résonnateur employé ne sont perçus, par l'oreille munie de ce résonnateur, que d'une manière plus ou moins confuse. Au contraire, si le son composé qui est soumis à l'analyse contient un son simple ayant même hauteur que le son propre du résonnateur, l'oreille entend éclater ce son, avec une intensité presque assourdissante. — C'est ainsi que l'on a pu constater l'existence de telle ou telle note, dans les sons complexes qui sembleraient d'abord les plus difficiles à analyser, comme le bruit d'une voiture, le sifflement du vent, le murmure de l'eau, etc.

(*) Dans les tuyaux à bouche, l'air du tuyau ne fait que renforcer le son produit par les vibrations de la lèvre *b* (*fig.* 269). Si, en effet, on enlève les parois du tuyau, on peut, avec l'embouchure et la lèvre *b*, obtenir des sons dont l'intensité est très faible, et dont la hauteur va en croissant d'une manière continue, à mesure qu'on augmente la force du vent. Quand le tuyau est reconstitué, et que la bouche est surmontée d'une colonne d'air de longueur déterminée L, cette colonne ne peut jouer le rôle de corps *renforçant* que pour certains sons particuliers : savoir, ceux dont les nombres de vibrations satisfont à la relation $n = (2p+1)\frac{v}{4L}$, s'il s'agit d'un tuyau fermé, ou à la relation $n' = p\frac{v}{2L}$, s'il s'agit d'un tuyau ouvert (note de la page 344) — La même remarque est applicable aux tuyaux à anche.

456. Résultats relatifs aux timbres des divers instruments, ou de la voix humaine. — La méthode des résonnateurs a été appliquée à l'analyse comparative des sons produits par les divers instruments, ou par la voix humaine. — Voici quelques-uns des résultats obtenus.

1° Lorsque des instruments de diverses espèces donnent une même note musicale, ils donnent un même son fondamental; mais chacun d'eux superpose à ce son tel ou tel *groupe d'harmoniques*, avec telle ou telle *intensité relative :* c'est là ce qui produit, entre les divers instruments, les *différences de timbres*. — Ainsi, le son d'un diapason, ou ceux que rendent, sous l'action d'un courant d'air faible, les gros tuyaux fermés de l'orgue, sont des sons simples, ou presque dénués d'harmoniques : le timbre de ces sons est sourd et sans éclat. — La présence des six premiers harmoniques, que l'on constate dans les notes graves du piano ou dans celles des tuyaux ouverts de l'orgue, donne aux sons de la plénitude et de l'éclat. — Dans le violon ou le violoncelle, le nombre des harmoniques superposés est généralement assez considérable, et d'autant plus grand que la corde est plus fine. De là, cette espèce de caractère d'acuité, que présente le timbre de ces instruments, et qui arrive à en rendre l'audition désagréable lorsqu'ils sont maniés par des exécutants inhabiles (*).

Ce sont encore des différences du même genre qui distinguent entre elles les *diverses voix* humaines. — Diverses voix, émettant *une même note sur une même voyelle*, lui impriment chacune un timbre particulier, que l'oreille reconnaît immédiatement, et qui dépend de la coexistence de tel ou tel groupe d'harmoniques, se superposant au son fondamental.

2° Quant aux différences qui distinguent, pour une même voix, les *diverses voyelles*, elles sont dues à une autre particularité. — D'après M. Helmholtz, chaque voyelle correspond à *un son de hauteur constante*, déterminé par la forme que prend la bouche en laissant passer l'air qui la traverse. — On peut donc dire que les voyelles se distinguent les unes des autres par un caractère qui offre quelque analogie avec celui du *timbre*. Mais ce caractère, au lieu d'être dû à l'addition de certains harmoniques du son fondamental, c'est-à-dire à un groupe de sons dont la hauteur dépendrait du son fondamental lui-même, est dû à un son qui dépend de la voyelle émise (**).

La pratique du chant a d'ailleurs montré, depuis longtemps, que l'émission des notes de diverses hauteurs ne se produit pas avec la

(*) Avec des cordes *métalliques* très fines, l'emploi des résonnateurs a permis de compter jusqu'à seize harmoniques superposés. C'est à la présence des harmoniques élevés qu'est dû le timbre sifflant des sons que rendent ces cordes.

(**) Dans la voix articulée, les *consonnes*, qui viennent s'ajouter aux voyelles, transforment en sons plus complexes les sons additionnels qui caractérisent chacune des voyelles, sans modifier la hauteur de l'impression dominante.

même facilité sur les diverses voyelles : que, par exemple, les notes graves sont plus faciles à donner sur la voyelle O ou sur le son OU; les notes moyennes, sur la voyelle A; les notes élevées, sur la voyelle É ou È. — Ces résultats sont aujourd'hui faciles à expliquer. La cavité de la bouche se comporte, en effet, comme une caisse de résonance, renforçant plus ou moins les sons produits par le larynx, selon les rapports qu'ils présentent avec le *son propre* de cette cavité. Or, suivant que la bouche prend la forme appropriée à l'émission de la voyelle allemande OU, ou à celle de nos voyelles O, A, È, I, on a pu constater que le son propre de sa cavité va successivement en s'élevant : par suite, la forme de la bouche devient apte à renforcer des sons de plus en plus élevés.

3° Enfin, l'emploi des résonnateurs a montré que les *bruits* se distinguent des sons musicaux, en ce qu'ils sont formés par la superposition de sons élémentaires qui ne sont point entre eux dans des rapports simples. — L'oreille n'éprouve alors qu'une sensation vague, à laquelle elle peut difficilement attribuer un caractère de hauteur, quand elle compare ces bruits à des sons musicaux. Les rapports de hauteurs ne deviennent appréciables que lorsqu'on compare entre eux plusieurs bruits analogues (404).

457. Méthode de synthèse des sons composés. — Les résultats qu'avait fournis l'analyse par les résonnateurs ont été confirmés par M. Helmholtz à l'aide d'une véritable méthode de synthèse, consistant à recomposer des sons complexes au moyen des divers sons élémentaires qu'on y a reconnus.

L'appareil comprend une série de diapasons, donnant les harmoniques successifs du son rendu par le plus grave d'entre eux, et disposés de façon que l'on puisse entretenir le mouvement vibratoire de chacun d'eux, à l'aide d'électro-aimants qui agissent périodiquement par attraction sur leurs branches. En présence de chaque diapason, est placé un tuyau renforçant, que l'on peut ouvrir plus ou moins au moyen des touches d'un clavier, sur lesquelles on appuie plus ou moins fortement. En faisant vibrer tous les diapasons à la fois et en ouvrant plus ou moins tels ou tels tuyaux renforçants, l'expérimentateur peut ainsi ajouter au son fondamental tels ou tels harmoniques, avec telle ou telle intensité.

L'expérience ainsi faite montre que l'on peut, par ce procédé, modifier le timbre du son fondamental perçu par l'oreille. « L'appareil permet, dit M. Helmholtz, de reproduire à volonté soit les *voyelles* de la voix humaine, soit les différents registres de l'*orgue*, pourvu qu'ils ne présentent pas d'harmoniques trop aigus : il manque cependant, aux sons de l'orgue ainsi imités, le bruit sifflant que donne le courant d'air en se brisant contre les lèvres du tuyau. On peut encore reproduire le nasillement de la *clarinette*, au moyen d'une série d'harmoniques impairs, et le son doux du *cor*, au moyen du chœur complet des diapasons. »

458. Phonographe. — Nous dirons maintenant quelques mots d'un instrument qui a été imaginé en Amérique, par M. Edison, et qui permet de reproduire, au bout d'un temps quelconque, les sons musicaux ou les paroles qu'on a prononcées dans son voisinage.

Le *phonographe* (*fig.* 296) se compose d'un cylindre métallique C, mobile autour d'un axe AA'. L'une des parties A' de cet axe présente un pas de vis, qui passe dans un écrou creusé dans le support S' : lorsqu'on tourne la manivelle M, le cylindre éprouve un déplacement progressif dans le sens de son axe, en même temps qu'il tourne autour de cet axe lui-même. Sur la surface du cylindre est creusée une rainure en

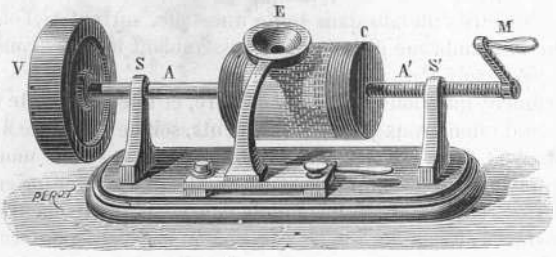


Fig. 296. — Phonographe de M. Edison.

forme d'hélice, dont le pas est le même que celui de la vis taillée sur l'axe : le cylindre est enveloppé par une feuille mince de papier d'étain, qui s'applique sur les bords saillants de la rainure, sans pénétrer dans les parties creuses. — Sur le côté du cylindre est disposée, sur un support fixe, une embouchure E, au fond de laquelle est une membrane métallique très mince *m* (*fig.* 297). Sous la membrane, est un petit style métallique très court, fixé à l'extrémité d'un ressort *a* : la membrane presse légèrement sur ce ressort, par l'intermédiaire de deux petites pièces de caoutchouc.

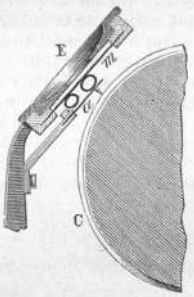


Fig. 297.

Avant de commencer l'expérience, on place le support de la membrane de manière que la pointe du style corresponde à l'un des points où la feuille d'étain passe au-dessus de la cavité de la rainure. — Puis on fait tourner le cylindre, d'un mouvement aussi uniforme que possible, et l'on émet, à haute voix, les paroles ou le chant que l'on veut faire reproduire par l'appareil. Chacune des impulsions communiquées par l'air à la membrane refoule le style, qui imprime à la feuille d'étain une sorte de gaufrage, plus ou moins profond, selon l'amplitude de l'impulsion elle-même. Il en résulte, sur cette feuille, un sillon hélicoïdal discontinu, formé par de petites dépressions dont les distances relatives dépendent de la hauteur du son, et dont la profondeur dépend de l'intensité du son. — Pour faire répéter à l'appareil la phrase ou le chant qui lui a été confié, on écarte d'abord le support qui porte la membrane et le style, et l'on ramène le cylindre

en arrière, jusqu'à sa position primitive; enfin, on rapproche le support, de manière que toutes les pièces se retrouvent dans leur position initiale. Le cylindre étant alors remis en mouvement avec la même vitesse que précédemment, le style, commandé maintenant par les dépressions ou les saillies de la feuille d'étain, communique successivement à la membrane toutes les impulsions qu'il en avait reçues, avec toutes les particularités de rythme et d'intensité relative. — Le son produit peut être entendu dans toute une salle, surtout si l'on a soin de munir la membrane d'un cornet, rassemblant les sons comme une sorte de porte-voix (*).

L'instrument que nous venons de décrire, et que représente la figure 296, a reçu de nombreux perfectionnements, soit de la part de M. Edison lui-même, soit de la part de divers constructeurs. — Le mouvement du cylindre peut être commandé par un moteur électrique qui en assure la régularité. — Au cylindre métallique couvert d'une feuille d'étain, on peut substituer de petits cylindres de carton, couverts d'une couche de cire ou d'une autre substance analogue, suffisamment résistante pour conserver les empreintes. — Ces cylindres, de dimensions uniformes peuvent ensuite être expédiés d'un lieu à un autre; en les replaçant alors sur un autre appareil semblable, on arrive ainsi à faire entendre, en un lieu quelconque, les phrases ou les airs de musique qui leur ont été confiés.

(*) L'*intensité absolue* des sons rendus par l'appareil est beaucoup moindre que celle des sons qui ont servi à l'impressionner. C'est ce qu'on s'explique sans peine, si l'on tient compte de la faiblesse des amplitudes des vibrations de la membrane.

Quant à la conservation du rapport des *hauteurs* des sons, elle exige expressément que la vitesse de rotation du cylindre reste absolument constante. C'est pour assurer, autant que possible, ce résultat, qu'on place sur l'axe un lourd volant V. — Pour la reproduction de phrases *parlées*, les inégalités de vitesse ont seulement pour conséquence de faire monter ou baisser légèrement la voix. Pour la reproduction des sons musicaux, on conçoit que l'inconvénient est beaucoup plus grave, les variations de hauteur des sons successifs arrivant à produire des dissonances extrêmement désagréables.

LIVRE QUATRIÈME

OPTIQUE

CHAPITRE PREMIER

PROPAGATION DE LA LUMIÈRE. — PHOTOMÉTRIE.

I. — PROPAGATION DE LA LUMIÈRE.

459. Sources de lumière. — Corps lumineux. — Certains corps ont, par eux-mêmes, un éclat qui nous les rend visibles sans l'intervention d'aucune lumière étrangère. Tels sont le soleil, les étoiles, les flammes de nos lampes, le charbon incandescent, etc. — Ce sont des *sources lumineuses*.

Au contraire, la plupart des corps qui nous entourent ne deviennent visibles qu'à la condition d'être *éclairés*, c'est-à-dire de recevoir d'une source la lumière qu'ils renvoient à notre œil.

Pour ce qui concerne les phénomènes que nous avons à étudier, il n'existe aucune différence entre la lumière émise directement par les sources lumineuses, et celle qui est renvoyée par les corps éclairés. Nous désignerons donc sous le nom de *corps lumineux* tous les corps qui sont visibles à notre œil, soit par eux-mêmes, soit sous l'influence d'une lumière étrangère.

460. Corps transparents et corps opaques. — On appelle corps *transparents*, ceux que la lumière peut traverser. — L'air, le verre sont des corps transparents : ils laissent arriver jusqu'à nous la lumière du soleil ou celle des corps lumineux en général.

On appelle *corps opaques*, ceux que la lumière ne peut pas traverser : tels sont le bois, la pierre, les métaux sous une épaisseur suffisante, etc.

461. Hypothèse de l'émission et hypothèse des ondulations. — Pour expliquer l'action que les corps lumineux exercent sur notre œil, deux hypothèses différentes ont été faites.

L'*hypothèse de l'émission*, due à Newton, suppose que les corps lumineux envoient, dans toutes les directions, des particules d'une substance ténue, impondérable, capable de traverser les corps transpa-

rents. Dans cette hypothèse, ce seraient les chocs de ces particules sur la rétine qui produiraient la sensation de la lumière.

L'*hypothèse des ondulations*, qui est due à Descartes, et qui a été précisée et développée par Huyghens, par Thomas Young, et surtout par Fresnel, assimile la propagation de la lumière à celle du son. Dans cette hypothèse, un corps lumineux, de même qu'un corps sonore, est le siège d'un mouvement vibratoire rapide, qui se transmet jusqu'à notre œil par l'intermédiaire d'un milieu élastique. Ce milieu ne peut être l'air atmosphérique, car nous apercevons les astres à travers les espaces vides de l'univers; on admet que c'est un fluide impondérable, répandu aussi bien dans le vide que dans l'air et dans les corps pondérables : ce fluide a reçu le nom d'*éther*.

En partant de l'hypothèse des ondulations, les physiciens modernes ont pu, non seulement expliquer les résultats fournis par l'expérience, mais encore en indiquer *a priori* un grand nombre d'autres, que l'observation a ensuite confirmés. — Certains résultats d'expérience sont, au contraire, en opposition avec la théorie de Newton. — Aussi est-ce l'hypothèse des ondulations qui est aujourd'hui exclusivement adoptée.

La partie de l'Optique que nous devons étudier peut d'ailleurs être exposée indépendamment de toute hypothèse sur la nature de la lumière. Nous ne nous étendrons donc pas davantage sur ce sujet, qui se rattache aux parties les plus délicates de la Physique.

462. Propagation rectiligne de la lumière. — Rayons lumineux. — Dans un milieu transparent et homogène, la lumière se transmet d'un point à un autre en suivant la *ligne droite* qui joint ces deux points. — Si, par exemple, on regarde un point lumineux avec un seul œil, et si l'on interpose un corps opaque sur la ligne droite menée de ce point à l'œil, on cesse de l'apercevoir. Cette droite représente donc la route suivie par la lumière, pour arriver à l'œil.

D'autre part, un point lumineux est visible pour tous les observateurs placés autour de lui. — On doit en conclure qu'il envoie des *rayons lumineux* dans *toutes les directions* (*).

463. Ombre. — Un corps opaque arrête tous les rayons lumineux qui le rencontrent : il y a donc, derrière un corps opaque, un espace où ne pénètre pas la lumière, et qu'on appelle *ombre portée*. — Les limites de l'ombre portée peuvent être déterminées géométriquement, d'après le principe de la propagation rectiligne de la lumière.

Considérons d'abord le cas purement idéal où le corps lumineux est réduit à *un seul point* S (*fig.* 298); soit C le corps opaque, auquel

(*) On peut remarquer encore que, si les rayons du soleil pénètrent dans une pièce obscure, par une ouverture pratiquée dans un volet, ils produisent une bande rectiligne. Cette bande est ici rendue visible par les poussières qui flottent dans l'air et que les rayons lumineux éclairent dans leur trajet.

nous donnerons une forme quelconque. — Menons, par le point lumineux S, une droite SA tangente au corps opaque, et supposons que cette droite se meuve de manière à occuper toutes les positions possibles, en passant toujours par S et restant tangente au corps C : elle décrira une surface conique ASB, ayant pour sommet le point S et comprenant le corps C dans son intérieur. Si l'on prend un point quelconque *m* à l'intérieur de cette surface et au delà de C, le rayon émis par S dans la direction S*m* sera intercepté par le corps opaque. Au contraire, un point *m'*, situé en dehors de cette surface, recevra un rayon lumineux S*m'*. — La surface du cône forme donc la limite entre les points qui sont dans l'ombre portée et ceux qui reçoivent la lumière de la source S.

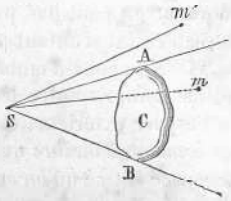


Fig. 298.

464. Pénombre. — Considérons maintenant le cas où la source lumineuse a *des dimensions sensibles :* c'est le cas de la plupart des sources avec lesquelles nous pouvons opérer. — Pour simplifier l'explication, nous prendrons le cas particulier où la source lumineuse et le corps opaque ont, l'un et l'autre, la forme *sphérique*.

Soient S (*fig.* 299) la sphère lumineuse, *o* la sphère opaque. Construisons le cône ARB tangent *extérieurement* aux deux sphères : un point quelconque *m*, situé dans ce cône et derrière la sphère opaque, ne peut recevoir aucun rayon lumineux, car toute droite joignant ce point à un point quelconque de la sphère S rencontrerait la sphère *o*. Donc, tous les points qui sont situés dans ce cône, au delà de la sphère opaque, sont *complètement dans l'ombre*. — Construisons maintenant le cône A'TB' tangent *intérieurement* aux deux sphères, et considérons deux points *m'*, *m''*, également distants de S, mais situés, l'un dans l'intervalle des deux cônes, l'autre en dehors du cône A'TB'. Si, du point *m''* comme sommet, on décrit un cône *pm''n* qui touche la sphère S suivant une circonférence *rst*, on voit que le point *m''* reçoit de la lumière de tous les points de la surface de la sphère lumineuse qui sont en avant de cette circonférence. Si, du point *m'* comme sommet, on décrivait un cône tangent à la sphère lumineuse, la portion de la sphère lumineuse située en avant de la circonférence de

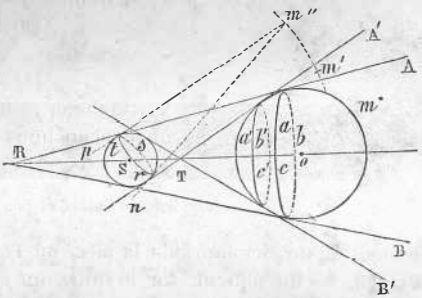


Fig. 299.

contact serait encore égale à la précédente; mais une portion des rayons lumineux compris dans ce cône est interceptée par le corps opaque et ne peut pas parvenir au point m'. La quantité de lumière interceptée est d'autant plus grande que le point m' est plus voisin de la surface du cône d'ombre ARB. — Donc, au delà de la sphère opaque, l'espace compris entre les deux cônes ARB et A'TB' est moins éclairé que l'espace extérieur, et la lumière qu'il reçoit *va en diminuant progressivement, à mesure qu'on s'approche de la région de l'ombre absolue.* Cet espace est ce qu'on appelle la *pénombre* (*).

Il est facile, par exemple, de constater la production de l'ombre et de la pénombre, en prenant comme corps lumineux la flamme d'une bougie (*fig.* 300), et comme corps opaque un écran PQ, placé paral-

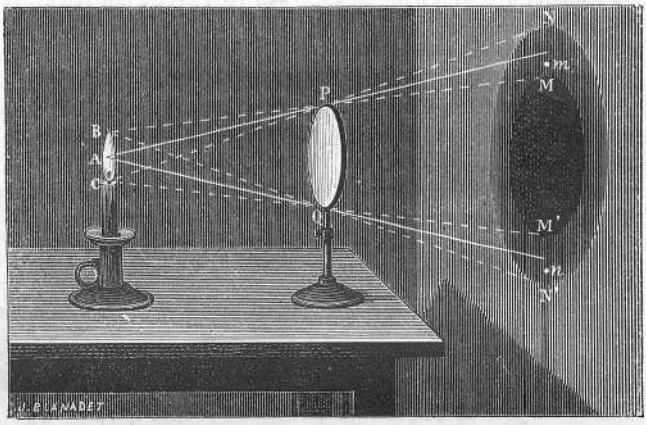


Fig. 300. — Ombre et pénombre.

lèlement à l'un des murs de la pièce où l'on opère, et à une certaine distance. — On obtient, sur le mur, une *ombre absolue* MM' de même forme que l'écran; puis, autour de cette ombre, une *pénombre*, où l'intensité lumineuse va en augmentant d'une manière progressive, jusqu'à la région NN' en dehors de laquelle le mur est éclairé par la flamme tout entière.

Il est de même pour les ombres des objets éclairés par le soleil : leurs contours présentent toujours une *pénombre*.

465. Formation des images dans la chambre obscure. — Lorsqu'on est placé dans une pièce fermée par des volets, et que l'un des volets MN

(*) Nous laisserons au lecteur le soin de discuter le problème des ombres, dans le cas où la sphère opaque serait plus petite que la sphère lumineuse, et dans le cas où elle lui serait égale.

présente une petite ouverture *mn* (*fig.* 301), on aperçoit sur un écran PQ placé à l'intérieur, à une certaine distance de l'ouverture, une image plus ou moins nette des objets placés à l'extérieur. — Ce phénomène s'explique encore par la propagation rectiligne de la lumière.

Considérons l'un des points A de l'objet lumineux AB : ce point éclaire les points de l'écran situés dans un cône dont le sommet est A, et dont les arêtes s'appuient sur le contour de l'ouverture. La petite surface éclairée a donc une forme *semblable à celle de l'ouverture.* Il en est de

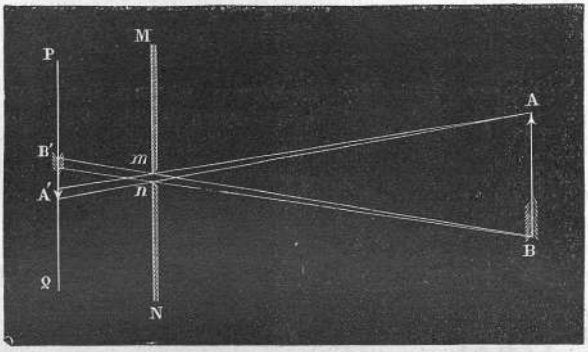


Fig. 301. — Formation des images dans la chambre obscure.

même pour chacun des points de l'objet lumineux AB. — Or, si l'ouverture est suffisamment petite, et si l'objet lumineux est suffisamment éloigné pour que les cônes dont il s'agit soient très aigus, chacune des petites surfaces éclairées pourra être assimilée à un point, et leur ensemble donnera une sorte d'image A′B′ de l'objet, dans une position *renversée* (*). — Si l'on éloigne progressivement l'écran PQ de l'ouverture, les dimensions de l'image A′B′ augmentent.

C'est par un phénomène tout à fait semblable que, dans l'ombre d'un arbre, les petites ouvertures, de formes très diverses, que laissent entre elles les feuilles, produisent sur le sol des images dont la forme elliptique est due à ce que les rayons solaires ont généralement une direction oblique par rapport au sol. On obtiendrait des images circulaires, sur une feuille de papier que l'on placerait perpendiculairement aux rayons solaires. — Enfin, pendant les éclipses partielles, quand le soleil éclipsé prend la forme d'un croissant lumineux, les images acquièrent elles-mêmes la forme de petits croissants.

(*) On verra plus loin que ce n'est pas là une véritable *image*, dans le sens qui sera défini à propos des miroirs ou des lentilles. — Si l'ouverture avait un diamètre un peu considérable, chaque point de l'objet éclairerait, sur l'écran, une surface de dimensions sensibles; toutes ces surfaces empiétant alors beaucoup les unes sur les autres, on n'aurait plus qu'un éclairement à peu près uniforme.

II. — PHOTOMÉTRIE.

466. Éclairements produits par une même source à diverses distances. — Soit S (*fig.* 302) une source lumineuse, de dimensions assez petites pour qu'on puisse la supposer réduite à un point. Décrivons, de ce point comme centre, avec un rayon SB égal à r, une surface sphérique AB. Cette surface reçoit toute la lumière émise par la source ; chaque élément de la surface AB, d'étendue s, reçoit normalement une quantité de lumière qui peut être considérée comme servant de mesure à l'*éclairement* que produit la source à la distance r. — Supprimons maintenant cette surface, et décrivons autour du point S une autre surface sphérique, avec un rayon SB′ égal à $2r$: elle recevra encore toute la lumière émise par la source ; mais, comme la surface de cette sphère est égale à 4 fois celle de la première, chaque élément, d'étendue s, recevra 4 fois moins de lumière. — En général, les quantités de lumière reçues normalement par une surface d'étendue s, placée successivement à différentes distances de la source, sont en raison inverse des carrés des distances ; ce qui revient à dire que l'*éclairement produit par une source lumineuse varie en raison inverse du carré de la distance de la source à la surface éclairée.*

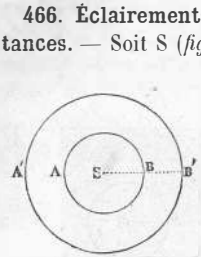


Fig. 302.

467. Intensités propres des sources lumineuses. — Nous considérerons l'*intensité propre* d'une source lumineuse comme définie par l'éclairement qu'elle produit *à l'unité de distance.*

On dit alors que les intensités propres de deux sources sont *égales*, lorsqu'elles produisent le même éclairement à l'unité de distance. — L'intensité propre d'une source lumineuse B est dite *double, triple* de celle d'une source A, quand la source B produit, à l'unité de distance, le même éclairement que deux, trois sources égales à A, agissant simultanément et dans des conditions identiques.

468. Comparaison des intensités propres des sources lumineuses, ou photométrie. — Les méthodes expérimentales que nous allons décrire, pour comparer les intensités propres de diverses sources lumineuses, reposent sur le théorème suivant:

Si deux sources lumineuses, placées à des distances D *et* D′ *d'une surface, produisent un même éclairement, les intensités propres* I *et* I′ *de ces deux sources sont proportionnelles aux carrés de leurs distances à cette surface.* En effet, l'intensité propre I de la première source étant définie par l'éclairement qu'elle produit à l'unité de distance, il résulte de ce que nous avons vu (466), que l'éclairement *à la distance* D sera

$\frac{I}{D^2}$. De même, si l'on représente par I' l'intensité propre de la seconde source, l'éclairement *à la distance* D', sera $\frac{I'}{D'^2}$. Dès lors, si l'on arrive à régler les distances D et D' de façon que ces deux éclairements soient égaux, on pourra poser :

$$\frac{I}{D^2} = \frac{I'}{D'^2}, \quad \text{d'où l'on tirera :} \quad \frac{I}{I'} = \frac{D^2}{D'^2}.$$

469. Photomètre de Foucault. — Le photomètre de Foucault n'est qu'un perfectionnement d'une disposition imaginée par *Bouguer*.

Les deux sources lumineuses A, B (*fig.* 303) sont disposées d'un même

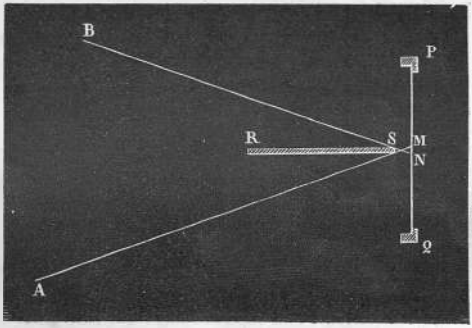


Fig. 303. — Photomètre de Foucault.

côté d'une lame de porcelaine translucide PQ, mais de part et d'autre d'un écran opaque RS, perpendiculaire à PQ, et de manière que les deux portions éclairées PN, QM, empiètent un peu l'une sur l'autre. Laissant alors immobile l'une des deux sources, on approche ou l'on éloigne l'autre, jusqu'à ce que les éclairements des deux moitiés de la plaque PQ paraissent égaux : on obtient le rapport des intensités propres des deux sources, en prenant le rapport des carrés de leurs distances à la plaque (468).

470. Photomètre de Rumford. — Dans le *photomètre de Rumford*, les deux sources L et B (*fig.* 304) sont placées devant un même écran blanc : entre elles et l'écran, on dispose une tige de bois verticale A. On obtient ainsi deux ombres : la première *f*, portée par la source B, ne reçoit de lumière que de la source L ; la seconde *f'*, portée par la source L, ne reçoit de lumière que de B. Si donc on fait varier la distance de l'une des deux sources à l'écran, jusqu'à ce que les deux ombres paraissent identiques, et si l'on mesure alors les distances de chaque source à l'ombre *qu'elle éclaire*, les intensités de ces sources seront entre elles comme les carrés de ces distances.

471. Unité d'intensité lumineuse. — Les unités employées pour évaluer les intensités des appareils d'éclairage ont d'abord été assez différentes, et parfois même insuffisamment définies. En France, on prenait le *carcel*, unité définie par l'intensité d'une lampe Carcel, brûlant à l'heure 42 grammes d'huile de colza épurée. Ailleurs, on prenait comme unité l'intensité d'une bougie, de diamètre déterminé, et faite d'une substance variable d'un pays à un autre.

En 1884, les savants, réunis en Conférence internationale, ont

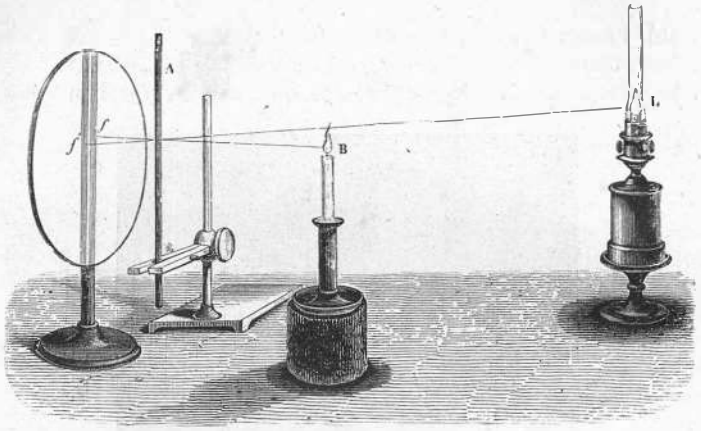


Fig. 304. — Photomètre de Rumford.

adopté, comme *unité absolue*, l'intensité, dans une direction normale, d'un centimètre carré de la surface d'un bain de platine incandescent, à la température de solidification du métal.

Cette unité étant un peu trop grande pour les applications industrielles, le Congrès des Électriciens, réuni à Paris en 1889, a fixé une *unité pratique*, qui a reçu le nom de *bougie décimale*, et qui vaut $\frac{1}{20}$ de l'unité absolue. — Ce choix a été déterminé par cette considération que le carcel, valant environ la moitié de l'unité absolue (environ 0,48), représente environ 10 bougies décimales.

(Voir à la fin du chapitre V la détermination de la vitesse de la lumière, qui exige la connaissance des principes des instruments d'optique).

CHAPITRE II

RÉFLEXION DE LA LUMIÈRE

I. — RÉFLEXION PAR LES SURFACES PLANES.

472. Lois de la réflexion. — Lorsqu'un rayon lumineux tombe sur a surface d'un corps solide opaque, parfaitement poli, ou sur la surface d'un liquide opaque comme le mercure, il n'y a de lumière renvoyée que dans une direction unique. C'est le phénomène de la *réflexion régulière*.

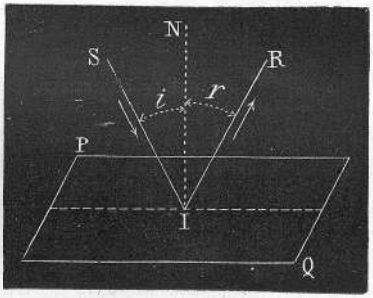


Fig. 305.

On appelle *plan d'incidence*, le plan déterminé par le rayon incident SI (*fig.* 305) et la normale IN menée à la surface réfléchissante PQ par le point d'incidence ; *angle d'incidence*, l'angle SIN formé par le rayon incident et la normale ; *angle de réflexion*, l'angle RIN formé par le rayon réfléchi et la normale. — Les lois de la réflexion sont les suivantes :

1° *Le rayon réfléchi reste dans le plan d'incidence.*

2° *L'angle de réflexion est égal à l'angle d'incidence.*

473. Vérification expérimentale. — Appareil de Silbermann. — On obtient une vérification de ces lois, au moyen de l'appareil de Silbermann (*fig.* 306). Un limbe divisé MN présente deux alidades R, S, mobiles autour de son centre : chacune d'elles porte un diaphragme *i*, *i'*, percé en son milieu d'une petite ouverture ; un miroir plan métallique A est fixé au centre du limbe, perpendiculairement au diamètre vertical BB′ du cercle. On dirige un faisceau de rayons solaires *ab*, au moyen du miroir auxiliaire *m*, de manière que la lumière passe par l'ouverture du diaphragme *i* et vienne rencontrer le miroir A au centre *c* du limbe. On constate alors que, pour recevoir la lumière réfléchie dans l'ouverture du diaphragme *i'*, il faut placer l'alidade R dans une position *symétrique de* S par rapport à BB′.

La normale au point d'incidence A étant parallèle au diamètre BB′, on voit : 1° que le faisceau incident et le faisceau réfléchi déterminent un plan qui contient la normale ; 2° que l'angle de réflexion est égal à l'angle d'incidence.

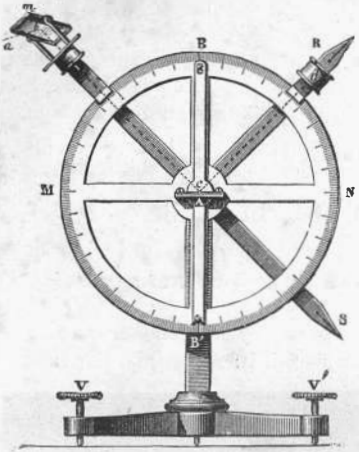


Fig. 306. — Appareil de Silbermann.

474. Vérification par les observations astronomiques faites au moyen du bain de mercure. — La vérification suivante est beaucoup plus précise. — On dispose une lunette IL (*fig.* 307), mobile sur un cercle divisé vertical, de manière à viser une étoile déterminée. En avant de cette lunette, on place un bain de mercure, dont la surface MN constitue un miroir horizontal, et l'on vise avec la lunette l'image de la même étoile, formée par réflexion sur le mercure : on constate qu'il faut amener la lunette dans une position I′L′, *symétrique* de IL par

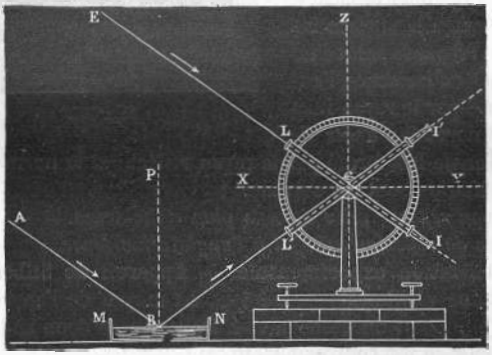


Fig. 307.

rapport au diamètre horizontal XY. — Or : 1° en raison de la grande distance de l'étoile, tous les rayons qu'elle nous envoie doivent être considérés comme parallèles à une même direction EL ; par suite, le rayon incident AB est parallèle à EL ; donc ce rayon et le rayon réfléchi déterminent un plan parallèle à celui du cercle divisé ; ce plan étant vertical, contient la normale BP menée à la surface du mercure par le

point d'incidence; 2° l'angle d'incidence ABP et l'angle LCZ sont égaux comme ayant leurs côtés parallèles et de même sens; l'angle de réflexion PBC et l'angle ZCI′ sont égaux comme correspondants; mais, d'après l'expérience, LCZ = ZCI′; donc ABP = PBC.

475. Réflexion de la lumière, dans la théorie des ondulations. — Dans la théorie de l'émission, les lois de la *réflexion* de la lumière s'expliquent immédiatement. Les particules lumineuses, tant que leur mouvement s'effectue dans un milieu homogène, doivent se mouvoir en ligne droite : c'est cette trajectoire rectiligne qui constitue le *rayon lumineux*. Lorsque l'une de ces particules rencontre une surface réfléchissante, elle doit être renvoyée par cette surface, suivant les lois générales du choc des corps élastiques, c'est-à-dire que sa nouvelle trajectoire, ou le rayon *réfléchi*, doit rester dans le plan d'incidence, et faire avec la normale un angle de réflexion égal à l'angle d'incidence.

Dans la théorie des ondulations, le *rayon lumineux* est la droite menée normalement à la surface de l'onde. Tant que la lumière émanée d'un point A (*fig.* 508) se propage dans un milieu homogène, les ondes sont limitées par des surfaces sphériques PQ, P′ Q′, P″Q″, ayant pour centre le point A; les rayons lumineux sont dirigés suivant les rayons mêmes de ces sphères. Lorsque les ondes viennent rencontrer un plan réfléchissant MM′, nous avons admis, en étudiant la réflexion des ondes sonores (417), que les *ondes réfléchies* sont limitées par des surfaces sphériques RS, R′S′..., ayant pour centre le point A′, symétrique du point A par rapport au plan MM′. — Considérons, sur le plan MM′, le point C qui appartient à la fois à la surface d'onde incidente P″Q″ et à la surface d'onde réfléchie RS. Au point C, le rayon lumineux incident est dirigé suivant la normale à la surface sphérique P″Q″, c'est-à-dire suivant AC; le rayon lumineux réfléchi est dirigé suivant la normale à la surface sphérique RS, c'est-à-dire suivant le prolongement CD de la droite A′C. Or si l'on mène en C la normale CN au plan MM′, il est aisé de voir, en s'appuyant sur l'égalité des triangles ABC et A′BC, que l'angle de réflexion NCD est égal à l'angle d'incidence NCA. — Les lois

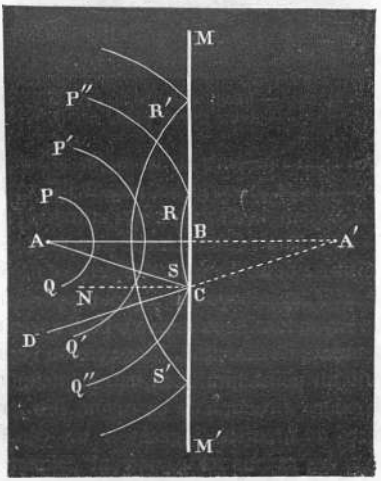


Fig. 508. — Réflexion de la lumière, dans la théorie des ondulations.

de la réflexion de la lumière s'expliquent donc, dans cette théorie, aussi bien que dans la théorie de l'émission.

476. Image d'un point, par réflexion sur un miroir plan. — Les *miroirs plans* sont des surfaces planes, présentant un poli aussi parfait que possible (*). Quand nous regardons dans un miroir plan, nous croyons voir, *derrière le miroir*, les objets lumineux qui sont placés en avant. — Il est aisé de voir que les lois de la réflexion permettent de se rendre compte de cette illusion.

Considérons d'abord un *point lumineux unique* A (*fig.* 309) placé devant un miroir plan. — Concevons un plan mené par A perpendiculairement au miroir, et prenons ce plan pour plan de la figure : soit MN la section du miroir par ce plan, et AB un rayon lumineux qui y soit contenu. Le rayon réfléchi BC sera également dans le plan de la figure, et il fera avec BP un angle PBC égal à PBA. Or, abaissons du point A sur le miroir une perpendiculaire AI, et prolongeons-la jusqu'à sa rencontre en A′ avec le prolongement du rayon réfléchi; les triangles AIB et A′IB sont égaux comme ayant le côté BI commun, et les angles IBA et IBA′ égaux comme compléments, l'un de l'angle d'incidence, l'autre de l'angle de réflexion : donc AI = A′I. — Le même raisonnement s'applique à un rayon quelconque émané du point A; donc *les prolongements de tous les rayons réfléchis passent au point A′, symétrique de A par rapport au plan réfléchissant.* — Or, quand un rayon lumineux arrive à l'œil après avoir subi un ou plusieurs changements de direction, l'impression reçue est toujours celle que produirait un point lumineux, situé quelque part sur le prolongement de la dernière direction de ce rayon. Dès lors, dans le cas actuel, si l'œil est placé de manière à recevoir un certain nombre de rayons réfléchis, tous ces rayons lui paraîtront *émaner du point A′*, qui appartient à la fois à tous leurs prolongements, et qu'on appelle *l'image* du point A.

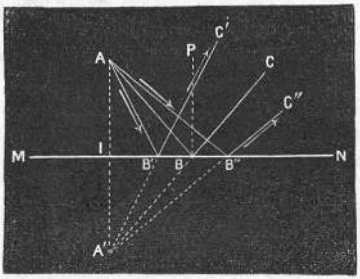


Fig. 309. — Image d'un point, produite par un miroir plan.

477. Image d'un objet. — Soit maintenant un objet rectiligne AD (*fig.* 310), placé devant un miroir plan. Chacun des points de cet objet ayant son image placée symétriquement par rapport au miroir MN,

(*) Les miroirs *étamés*, comme ceux qui forment les glaces de nos appartements, sont formés par une lame de verre, à la surface *postérieure* de laquelle est appliquée une couche mince d'étain : cette couche est ce qu'on appelle le *tain* des glaces. C'est à la surface de l'étain que se produit la réflexion, mais le passage de la lumière au travers du verre rend ici le phénomène un peu plus compliqué, comme nous le montrerons plus loin (481).

l'image de la droite AD est une droite A'D', symétrique de AD par rapport à MN. Si enfin on assigne à l'œil de l'observateur une position particulière PQ, et qu'on veuille se rendre compte de la marche des rayons lumineux qui lui donnent la sensation des divers points de cette image, on procédera de la manière suivante. Pour le point A', par exemple, on joindra d'abord ce point aux bords de la pupille; on déterminera l'intersection BC de la surface réfléchissante avec les arêtes du cône ainsi obtenu; enfin, on joindra les points de cette intersection au point A. Parmi les rayons émis par A, ceux qui concourent, pour l'œil, à la production de l'image A', sont les rayons qui sont contenus dans le cône ABC et qui sont réfléchis par la surface BC vers la pupille PQ. — On procédera de même, soit pour le point D', soit pour tout autre point de l'image.

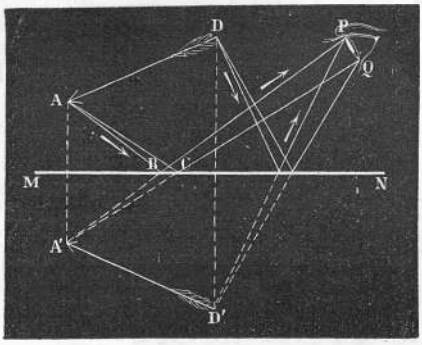


Fig. 510. — Image d'un objet.

L'image d'un objet, de figure quelconque, est la figure *symétrique* par rapport au plan réfléchissant; il en résulte qu'elle n'est point généralement superposable à l'objet. C'est ainsi, par exemple, que l'image d'une personne placée devant un miroir ne peut pas être considérée comme la reproduction exacte de la personne elle-même : le côté droit de l'image est l'image du côté ganche de la personne, et réciproquement.

Ces images n'ont d'ailleurs aucune réalité, en ce sens que les points de l'espace où l'œil les voit ne reçoivent pas la lumière réfléchie : on les nomme *images virtuelles*.

478. Mesure optique des déplacements angulaires imprimés à un système mobile autour d'un axe. — La réflexion de la lumière par un miroir plan fournit un moyen simple de mesurer, avec une grande précision, les déplacements angulaires d'un système quelconque, mobile autour d'un axe.

Considérons le cas le plus ordinaire, celui où le système est mobile *autour d'un axe vertical* S; joignons à ce système un petit miroir *vertical m*, de manière que la surface réfléchissante passe par l'axe S. Le système étant dans sa position d'équilibre initiale, disposons une lunette horizontale L (*fig.* 511), dont l'axe soit dans la direction de la normale SN au plan du miroir, et une règle horizontale divisée, placée parallèlement au miroir, à une distance SA, qui aura été mesurée une

fois pour toutes. En mettant l'œil à la lunette, on voit alors en coïncidence le croisé des fils de son réticule et l'image du point A′ de la règle divisée, vue par réflexion sur le miroir. C'est en ce point A qu'est placé le zéro commun à deux graduations qui s'étendent à droite et à gauche du point A. — Lorsque le miroir tourne d'un angle α, on voit dans la lunette l'image d'un point A′ de la règle : le numéro de la division observée fait connaître la distance AA′. Or l'angle NSN′, dont a tourné la normale au miroir, n'est autre que l'angle α ; et puisque les angles d'incidence et de réflexion ASN′ et N′SA′ sont égaux, il s'ensuit que l'angle A′SA est double de α. L'angle 2α est alors déterminé par la relation

$$\text{tang } 2\alpha = \frac{AA'}{SA}.$$

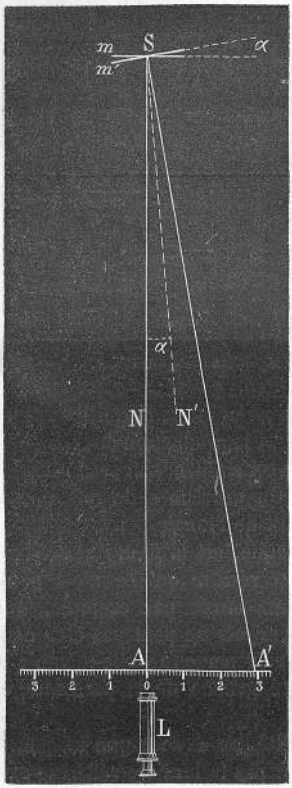


Fig. 311. — Mesure optique d'un déplacement angulaire.

Ce procédé de mesure de l'angle α comporte une très grande précision, les erreurs *relatives*, commises sur les mesures de SA et de AA′, étant d'autant plus petites que la distance SA est plus grande (*).

479. Réflexion à la surface des corps transparents. — La réflexion peut aussi se produire à la surface des corps transparents, comme l'eau, le verre, etc. Mais ces corps ne réfléchissent, en général, *qu'une partie* de la lumière incidente. — Si, par exemple, un rayon lumineux AB (*fig.* 312) rencontre une surface de verre MN, une portion de la lumière incidente est réfléchie, suivant BC ; une autre portion pénètre dans le verre, et, au lieu de continuer sa route suivant BA′, elle prend une direction telle que BD : c'est le phénomène de la *réfraction*, que nous étudierons plus loin.

(*) Quand on veut rendre l'expérience visible simultanément pour plusieurs observateurs, on remplace la lunette L par une fente lumineuse verticale très étroite, et l'on interpose, entre cette source lumineuse et le miroir, une lentille convergente, de façon que le faisceau convergent vienne, après réflexion sur le miroir plan, former une image réelle de la fente sur la règle. — Le même résultat peut être obtenu sans l'emploi d'une lentille convergente, en remplaçant le miroir plan par un petit miroir *concave*, qui donne encore sur la règle une image réelle de la fente.

Un caractère essentiel de la réflexion à la surface des corps transparents, c'est que *la proportion de lumière réfléchie augmente avec l'angle d'incidence.* — On peut le vérifier, en recevant, dans une chambre obscure, un faisceau lumineux sur une lame de verre. Si la lame est presque perpendiculaire aux rayons incidents, le faisceau réfléchi est très peu intense, et le faisceau transmis est presque aussi intense que le faisceau incident. Au contraire, si l'angle d'incidence est voisin de 90 degrés, c'est le faisceau transmis qui a une intensité presque nulle, tandis que le faisceau réfléchi a une intensité presque égale à celle du faisceau incident (*).

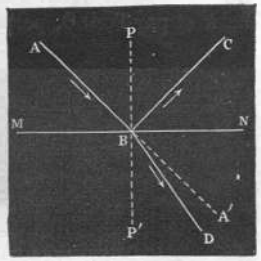


Fig. 312. — Réflexion à la surface d'un corps transparent.

480. Réflexion irrégulière, ou diffusion. — Si, dans une chambre obscure, on introduit un faisceau de rayons solaires et qu'on le fasse tomber sur un miroir plan, un observateur placé dans l'appartement ne reçoit de lumière que s'il se trouve dans la direction même des rayons réfléchis suivant les lois indiquées. Au contraire, si le faisceau solaire est reçu sur un mur blanc, la surface éclairée devient visible de tous les points de la chambre; cette surface renvoie donc des rayons lumineux *dans toutes les directions.* C'est ce qu'on nomme la *réflexion irrégulière* ou la *diffusion.* — On peut se rendre compte de ce phénomène, en remarquant que chacune des aspérités d'un corps non poli doit être considérée comme formée par une infinité de petites surfaces planes, diversement orientées, et, par suite, réfléchissant la lumière dans toutes les directions.

C'est la réflexion diffuse qui nous fait distinguer, pendant le jour, les objets qui ne reçoivent pas directement la lumière solaire. — Quand le ciel est pur, les objets directement éclairés par le Soleil renvoient de la lumière aux objets placés à l'ombre, en sorte que ceux-ci reçoivent alors une lumière adoucie, mais généralement encore assez considérable. — Quand le ciel est couvert, les nuages diffusent la lumière du Soleil dans toutes les directions, en sorte que les différents objets ne peuvent plus produire d'ombres.

481. Images multiples produites par un miroir étamé. — Un miroir

(*) Une observation semblable peut être faite sur une vitre placée dans un lieu éclairé. — Si l'observateur regarde la vitre presque normalement, il ne reçoit que la lumière émise par les objets placés de l'autre côté. — Au contraire, s'il la regarde dans une direction très oblique, il ne reçoit que la lumière émise sur la vitre par les objets placés du même côté que lui. — Dans les directions intermédiaires, il distingue à la fois les objets placés des deux côtés, mais avec des intensités variables, selon la position de l'œil par rapport à la normale menée au point de la vitre vers lequel il est dirigé.

de verre étamé présente, en réalité, deux surfaces capables de réfléchir la lumière, savoir : la *face antérieure* du verre, et le *tain* qui est appliqué sur sa face postérieure ; aussi, ces miroirs donnent-ils des images multiples.

Considérons ce qui se passe dans un plan mené par un point lumineux A et par l'œil ●, perpendiculairement aux deux faces BB′ et CC′ d'un miroir de verre étamé (*fig.* 313). — Une première image se forme au point *a*, symétrique de A par rapport à BB′ : elle est due à des rayons tels que A*m*, réfléchis sur la face libre du verre. Une deuxième image *a′*, est produite par des rayons tels que A*n*, qui se réfractent en *n* et pénètrent dans le verre, puis se réfléchissent en *p*, et se réfractent une seconde fois en *r*, pour arriver finalement à l'œil suivant *r*●. Une troisième image *a″* est due à des rayons, tels que *Astqxy*O, réfléchis deux fois sur la face inférieure et une fois sur la face supérieure ; et ainsi de suite. — Chacune des réflexions successives donnant toujours lieu à une perte d'intensité, l'éclat des images va en diminuant, à mesure qu'elles s'éloignent de *a′*.

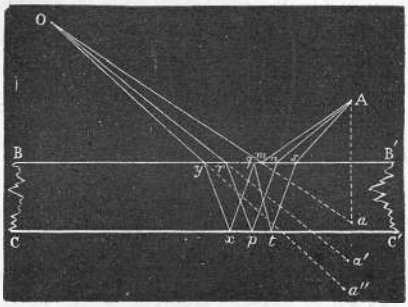


Fig. 313. — Images multiples, produites par un miroir étamé.

En plaçant, par exemple, une bougie assez près d'une glace d'appartement, et mettant l'œil également au voisinage de la glace, mais assez loin de la bougie, on aperçoit une succession d'images de la flamme, voisines les unes des autres, et d'intensités décroissantes.

482. Images produites par deux miroirs parallèles. — Un point lumineux S (*fig.* 314) étant placé de façon à émettre de la lumière sur deux miroirs parallèles, AA′, BB′, on aperçoit, derrière chacun d'eux, une série d'images dont il est facile de déterminer la disposition

Et d'abord, les rayons qui arrivent à l'œil après avoir subi une *seule réflexion*, soit sur l'un des miroirs, soit sur l'autre, donnent les deux images a_1, et b_1, respectivement symétriques de S par rapport à AA′ et par rapport à BB′. — Pour rendre compte des images que l'on observe au delà de a_1 et au delà de b_1, et qui sont produites par des rayons arrivant à l'œil après *plusieurs réflexions successives*, il suffit de remarquer que, après chaque réflexion sur l'un des miroirs, les rayons paraissent diverger d'un point qui est le symétrique, par rapport à ce miroir, du point de divergence immédiatement précédent. — Si α et β sont les distances de S à AA′ et à BB′, on obtient ainsi, derrière le

miroir AA′, des images a_1, a_2, a_2..., dont les distances au point S sont successivement

$$2\alpha, \quad 2\alpha + 2\beta, \quad 4\alpha + 2\beta, \quad 4\alpha + 4\beta, \quad 6\alpha + 4\beta \ldots\ldots ;$$

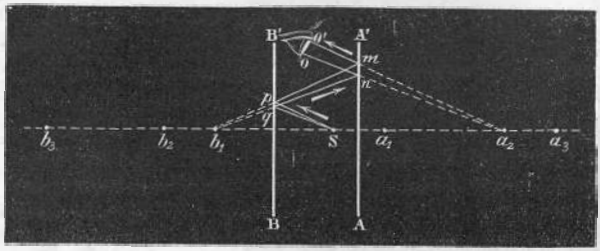


Fig. 314. — Images produites par deux miroirs parallèles.

et, derrière BB′, des images b_1, b_2, b_3..., dont les distances au même point S sont :

$$2\beta, \quad 2\beta + 2\alpha, \quad 4\beta + 2\alpha, \quad 4\beta + 4\alpha, \quad 6\beta + 4\alpha \ldots\ldots$$

On voit que la distance de deux images consécutives, dans chacune de ces deux séries, est alternativement 2α et 2β (*).

483 Images produites par deux miroirs faisant entre eux un certain angle. — Lorsque deux miroirs font entre eux un certain angle, un point lumineux placé dans cet angle donne une succession d'images, en nombre variable avec la valeur de l'angle lui-même.

Pour concevoir comment se produisent ces images, prenons d'abord le cas le plus simple, celui de deux miroirs OA et OB formant entre eux *un angle droit* (*fig.* 315.) — Soit S un point lumineux, placé dans cet angle. Il se forme d'abord une image a_1, produite par des rayons qui ont subi une seule réflexion sur le miroir OA : ce point a_1 est le symétrique de S par rapport à OA. — Il se forme, de même, une image b_1, produite par des rayons qui ont subi une seule réflexion sur le miroir OB ; ce point b_1 est le symétrique de S par rapport à OB. — Mais il se forme encore une autre image a_2, produite par des rayons qui ont été réfléchis d'abord par le miroir OB, puis par le miroir OA, et qui n'arrivent à l'œil de l'observateur qu'après ces deux réflexions. La figure montre

(*) La figure 314 indique la construction à effectuer pour obtenir la marche des rayons qui donnent à l'œil, supposé placé en 00′, la sensation de l'une de ces images, a_2 par exemple. On construit le cône ayant pour base le contour de la pupille et pour sommet le point a_2 ; puis le cône ayant pour base l'intersection *mn* du précédent avec AA′ et pour sommet b_1 ; enfin, le cône ayant pour base l'intersection *pq* de celui-ci avec BB′, et pour sommet S : la marche de la lumière, du point S à l'œil, est celle qu'est indiquée par les flèches. — Les miroirs ayant toujours des dimensions finies, si l'œil est placé en dehors de l'espace qu'ils comprennent, il pourra se faire qu'on n'aperçoive, dans chacune des séries, qu'un nombre fini d'images.

que ces rayons, émis par le point S, se comportent, après leur réflexion sur le miroir OB, comme s'ils émanaient du point b_1, symétrique de S par rapport à OB; après leur réflexion sur le miroir OA, ils se comportent comme s'ils émanaient du point a_2, symétrique de b_1 par rapport à la direction AA'. — Quant aux rayons qui éprouvent une première réflexion sur le miroir OA et une seconde réflexion sur le miroir BO, ils donnent une image au point symétrique de a_1 par rapport à la direction BB' : mais, dans le cas particulier que nous considérons, où l'angle des miroirs est droit, ce point se confond avec le point a_2. — On verra d'ailleurs facilement que, dans ce cas particulier, aucun rayon ne peut subir plus de deux réflexions.

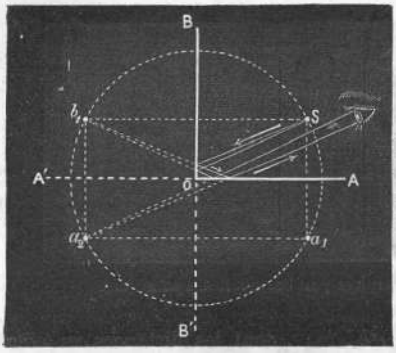


Fig. 315. — Images produites par deux miroirs faisant entre eux un angle droit.

Donc, quand deux miroirs font entre eux un angle droit, l'œil peut apercevoir *quatre fois* un même point lumineux placé dans l'angle des miroirs, savoir : *une fois directement, et trois fois par réflexion*. Les quatre points S, a_1, a_2, b_2, sont à égale distance du point O : c'est ce qu'il est facile de démontrer; en d'autres termes, ils sont distribués sur une circonférence ayant O pour centre et OS pour rayon (*).

484. Kaléidoscope. — Cet appareil, imaginé par le physicien anglais Brewster, est formé par un tube de carton ou de métal, dans lequel sont fixés deux miroirs inclinés, placés de manière que leur intersection soit dirigée parallèlement à l'axe du tube. L'angle des deux miroirs est de 60 degrés. A l'une des deux extrémités du tube se trouvent de petits fragments de verre, de diverses couleurs, placés entre deux parois de verre ordinaire. L'œil, appliqué à l'autre extrémité du tube, aperçoit, en une sorte de rosace à six compartiments, la figure formée par les fragments du verre alternant avec la figure symétrique. — En secouant le tube, ou en le faisant tourner sur lui-même, on modifie la disposition des fragments de verre les uns par rapport aux autres, et on peut ainsi faire subir une multitude de transformations à la figure régulière qu'ils forment avec leurs images.

(*) On trouve que, si l'angle des miroirs est contenu *un nombre pair* $2n$ *de fois* dans quatre angles droits, le nombre des images est égal à $2n - 1$; l'œil aperçoit donc $2n$ fois le point lumineux, savoir : une fois directement, et $2n - 1$ fois par réflexion.

II. — MIROIRS SPHÉRIQUES.

485. Miroirs sphériques. — Définitions. — Une surface courbe peut, en chacun de ses points, être considérée comme se confondant avec le plan tangent mené par ce point. Tout rayon lumineux qui rencontre une surface courbe se réfléchit donc comme il le ferait *sur le plan tangent mené au point d'incidence.*

Nous nous bornerons à l'étude des *miroirs sphériques.* — Ces miroirs sont dits *concaves* ou *convexes*, selon que leur face réfléchissante est la face interne ou la face externe de la portion de surface sphérique qui les constitue.

La *base* MN du miroir (*fig.* 316) est le plan du petit cercle qui en forme le bord. — On appelle *axe principal*, la perpendiculaire CO menée du centre C de la sphère sur le plan de la base. — Le point O, où l'axe rencontre la surface réfléchissante, est le *sommet* du miroir.

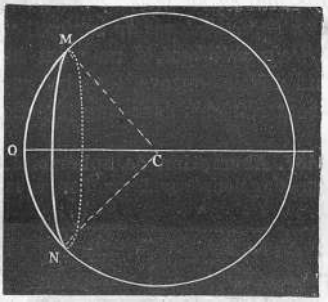


Fig. 316.

Un plan quelconque passant par l'axe coupe le miroir suivant un arc de grand cercle MON : l'*ouverture* du miroir est l'angle MCN, formé par les droites menées du centre aux extrémités de l'arc MN. Nous supposerons, dans ce qui va suivre, que l'ouverture ne comprenne qu'*un petit nombre de degrés.*

486. Miroirs sphériques concaves. — Foyer principal. — Soit MON (*fig.* 317) la section d'un miroir sphérique *concave*, par un plan mené par l'axe principal ; prenons ce plan pour plan de la figure, et, dans ce plan, soit RI un rayon lumineux parallèle à l'axe. La normale menée au point d'incidence I n'est autre que le rayon IC de la sphère ; par suite, le plan d'incidence se confond avec le plan de la figure et le rayon réfléchi IF est aussi contenu dans ce plan. — Soit F le point où ce rayon coupe l'axe principal ; l'angle ICF, égal à l'angle d'incidence RIC, est aussi égal à l'angle de réflexion CIF ;

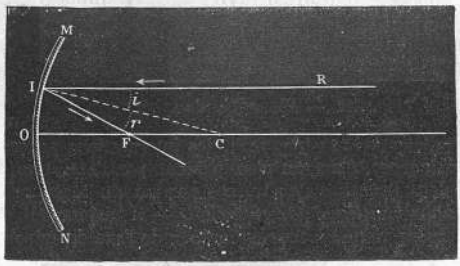


Fig. 317.

donc le triangle IFC est isocèle, et FC = FI. D'ailleurs, l'ouverture du miroir étant supposée très petite, OI est très petit par rapport à FO, en sorte que l'on peut considérer, dans l'égalité précédente, FI comme sensiblement égal à FO, ce qui donne définitivement

$$FC = \frac{1}{2} OC.$$

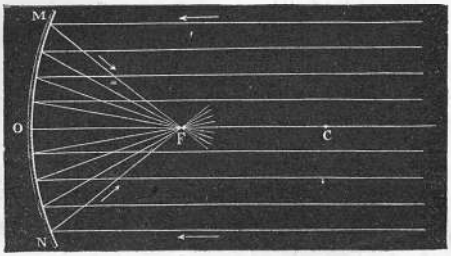


Fig. 318. Foyer principal d'un miroir sphérique concave.

Ce résultat étant indépendant de la position du rayon incident RI, on voit que *tous les rayons incidents parallèles à l'axe principal doivent concourir, après réflexion, en un même point* F, qu'on appelle le *foyer principal*, et qui est *à égale distance du centre* C *et du sommet* O *du miroir* (*fig.* 318).

Réciproquement, si un point lumineux est placé au foyer principal d'un miroir concave, tous les rayons émis par ce point sur le miroir seront réfléchis dans une direction parallèle à l'axe principal.

487. Aberration de sphéricité. — Caustiques par réflexion. — Les approximations par lesquelles nous avons déterminé le point où le rayon réfléchi IF (*fig.* 317) vient couper l'axe, cessent d'être applicables *lorsque l'ouverture est assez considérable.*

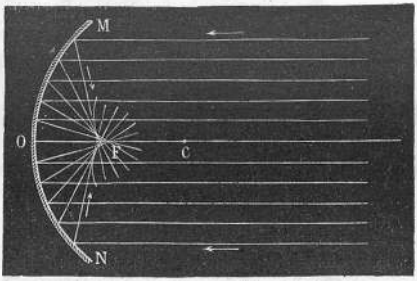


Fig. 319. — Aberration de sphéricité.

Dans ce cas, on reconnaît facilement que, pour des rayons incidents parallèles à l'axe principal, les rayons réfléchis viennent rencontrer l'axe en des points d'autant plus voisins du sommet O que l'incidence a lieu plus près du bord. Si donc un semblable miroir reçoit un large faisceau de rayons parallèles à l'axe (*fig.* 319), les intersections successives des rayons réfléchis dessineront, dans un plan passant par l'axe, une courbe lumineuse, formée de deux branches symétriques partant du foyer principal F : cette courbe se nomme *caustique par réflexion*. — Si maintenant on imagine que le plan de la figure vienne à tourner autour de l'axe du miroir, cette courbe engendrera une surface de révolution, dite *surface caustique*. On peut rendre manifeste la concentration de lumière qui se produit aux divers points de cette surface, soit en la coupant par un petit écran, soit en projetant une poussière fine dans l'espace situé en avant du miroir. — On donne, à ce défaut de convergence absolue, le nom d'*aberration de sphéricité*. Elle est d'autant moindre que l'ouverture du miroir est plus petite.

488 Foyer réel d'un point situé sur l'axe principal. — Soit MN (*fig.* 320) la section du miroir par un plan passant par l'axe principal OC; soit P un point lumineux situé sur cet axe, au delà du centre, et PI un rayon incident. La normale au point I est le rayon CI de la sphère : le rayon réfléchi IP′ sera dans le plan de la figure, et fera un angle de réflexion CIP′ égal à l'angle d'incidence PIC. Soit P′ le point où ce rayon coupe l'axe principal (*). — Si nous désignons par α, β et γ les angles IPO, IP′O et ICO, les angles d'incidence et de réflexion ont respectivement pour valeurs : $i = \gamma - \alpha$ et $r = \beta - \gamma$. Écrivons que ces deux angles sont égaux; il vient : $\gamma - \alpha = \beta - \gamma$, ou

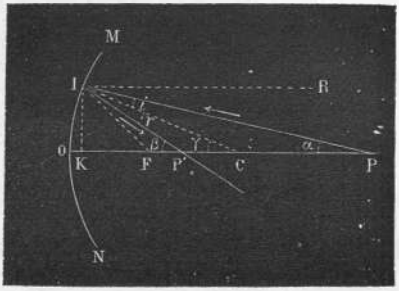


Fig. 320.

$$\alpha + \beta = 2\gamma.$$

Abaissons du point I la perpendiculaire IK sur l'axe principal; si l'ouverture du miroir est assez petite, on peut considérer cette droite IK comme peu différente de chacun des trois arcs de cercle qui seraient décrits des points P, P′ et C comme centres, avec des rayons égaux à PO, CO, et P′O, et interceptés par les côtés des angles α, β, γ. Les angles α, β et γ ont alors respectivement pour mesures $\frac{IK}{OP}$, $\frac{IK}{OP'}$, $\frac{IK}{OC}$, et la relation (1) devient, en supprimant le facteur commun IK,

$$\frac{1}{OP} + \frac{1}{OP'} = \frac{2}{OC}. \qquad (2)$$

Cette relation montre que la distance OP′ ne dépend que des distances OP et OC, c'est-à-dire *de la position du point* P sur l'axe du miroir. — Donc tous les rayons émanés d'un même point P doivent, après réflexion, venir passer sensiblement par *un même point* P′.

Pour le vérifier, il suffira de disposer, en regard du miroir, sur son axe principal et à une assez grande distance, une source lumineuse de très petites dimensions : en plaçant un petit écran entre F et C, et en réglant par tâtonnements la position de cet écran, on arrivera à réduire sensiblement à un point la région de l'écran éclairée par les rayons réfléchis. — Le point P′ est dit un *foyer réel.*

(*) Si le point lumineux P est au delà du centre C (*fig.* 320), le point P′ est placé entre le centre C et le foyer principal F; en effet, si le miroir recevait en I un rayon RI parallèle à l'axe, ce rayon se réfléchirait suivant IF; or, l'angle d'incidence PIC étant plus petit que RIC, l'angle de réflexion CIP′ doit être plus petit que CIF; par suite, le point P′ doit être placé entre F et C.

Inversement, si le point lumineux était en P′, les rayons réfléchis iraient tous passer sensiblement par P. — Les deux points P et P′ sont donc *réciproques* l'un de l'autre; on les nomme *foyers conjugués*.

La même construction montre :

1° Que si le point lumineux P se rapproche du centre C, son foyer P′ s'en rapproche également, en s'éloignant du foyer principal F; car, le rayon incident PI (*fig.* 320) se rapprochant alors de CI, le rayon réfléchi IP′ doit s'en rapprocher également;

2° Que si le point lumineux est situé entre le centre C et le foyer principal F, son foyer, qui est situé au delà du centre, s'en éloigne d'autant plus que le point lumineux s'approche davantage de F. — Enfin, si le point lumineux arrivait exactement au point F, nous avons déjà vu (486) que les rayons réfléchis deviendraient parallèles à l'axe : il n'y aurait plus, à proprement parler, de foyer.

489. Foyer virtuel d'un point situé sur l'axe principal. — Il reste enfin à examiner le cas où le point lumineux P est situé entre le foyer principal F et le miroir (*fig.* 321). — Soit PI un rayon incident quelconque : si le miroir recevait en I un rayon émané du foyer principal F, ce rayon serait réfléchi parallèlement à l'axe; donc le rayon réfléchi actuel IS, qui doit s'écarter davantage de la normale CI, ne peut rencontrer l'axe en avant du miroir; mais le prolongement géométrique IP′ de ce rayon vient couper l'axe en P′, derrière la surface réfléchissante. — Désignons encore par α, β et γ les angles IPO, IP′O et ICO; par i et r les angles d'incidence et de réflexion; on aura les relations : $i = \alpha - \gamma$, $r = \beta + \gamma$, d'où l'on déduit

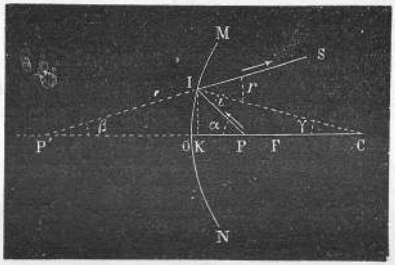


Fig. 321.

$$\alpha - \beta = 2\gamma. \qquad (1')$$

En supposant toujours l'ouverture du miroir très petite et en adoptant les mêmes notations que dans le cas précédent, la relation (1′) devient :

$$\frac{1}{OP} - \frac{1}{OP'} = \frac{2}{OC}, \qquad (2')$$

c'est-à-dire que les prolongements géométriques de tous les rayons réfléchis viennent passer sensiblement *par un même point* P′ (*fig.* 322), qui prend encore le nom de *foyer* du point P.

On remarquera que, la lumière ne parvenant pas réellement à ce point, on ne peut songer à en vérifier la position au moyen d'un écran.

Mais, si l'œil est placé sur le trajet des rayons réfléchis, il perçoit ces rayons comme s'ils émanaient du point P′, c'est-à-dire qu'il *voit* un point lumineux en P′. Ce point prend alors le nom de *foyer virtuel*.

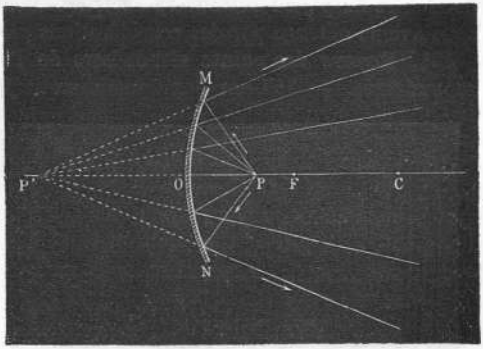


Fig. 322. — Foyer virtuel.

Réciproquement, si l'on recevait sur le miroir des rayons dont les directions prolongées allassent *concourir* au point P′, les rayons réfléchis viendraient converger au point P, en avant de la surface réfléchissante. Pour cette raison, on désigne encore le système des deux points P et P′ sous le nom de *foyers conjugués*.

490. Relation numérique entre les distances conjuguées. — Remarquons que la relation (2′) ne diffère de la relation (2) que par le signe de la grandeur OP′. Or, dans le premier cas (*fig.* 320), la grandeur OP′ était portée à droite du miroir, *dans le sens de la lumière réfléchie* ; dans le second cas (*fig.* 321), cette grandeur OP′ est portée à gauche du miroir, *en sens inverse de la lumière réfléchie* ; selon les conventions usitées en géométrie, on doit donc, dans le second cas, considérer OP′ comme une grandeur négative. — Si l'on adopte ces conventions, et si l'on désigne par R le rayon de courbure et par p et p' les distances OP et OP′, on voit que, quelle que soit la distance p, la distance p' sera déterminée, en grandeur et en signe, par l'équation

$$\frac{1}{p}+\frac{1}{p'}=\frac{2}{R}.$$

Plus généralement, étant données deux des trois quantités p,p' et R, on pourra déterminer la troisième à l'aide de cette relation.

On voit que, si l'on fait $p=\infty$, c'est-à-dire si l'on considère des rayons incidents parallèles à l'axe principal, la formule précédente donne $p'=\frac{R}{2}$; c'est la position déjà obtenue (486) pour le foyer principal. Si donc on désigne par f la distance focale principale, on a $\frac{1}{f}=\frac{2}{R}$, et la relation précédente peut alors s'écrire :

$$\frac{1}{p}+\frac{1}{p'}=\frac{1}{f}. \qquad (1)$$

En donnant à p diverses valeurs, et discutant les valeurs correspondantes de p', on retrouvera analytiquement tous les résultats que nous avions obtenus par des considérations géométriques (*).

491. Foyers des points situés hors de l'axe principal. — Axes secondaires. — Soit un point lumineux A (*fig.* 323), situé hors de l'axe principal du miroir, mais de telle sorte que la droite AC, menée de ce point au centre du miroir, ne fasse avec l'axe principal qu'un petit angle; cette droite AC rencontrera alors la surface du miroir en un point B. Le miroir présentant, dans les points voisins de B, la même symétrie que dans les points voisins du sommet O, on pourra appliquer à cette droite tout ce qui a été dit de l'axe OC dans les paragraphes précédents; il en résulte que tous les rayons partis d'un même point A de la droite AB passeront, après réflexion, *par un même point* A′ situé sur cette droite ; et que, inversement, des rayons émanés du point A′ iraient concourir au point A. — La droite AB se nomme l'*axe secondaire* du point A ; les points A et A′ sont deux *foyers conjugués* sur cet axe.

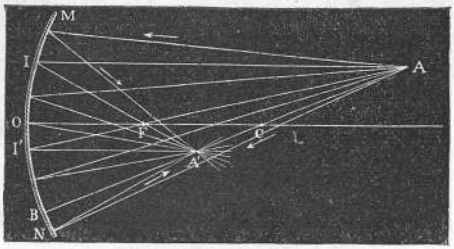


Fig. 323.
Foyers conjugués, sur un axe secondaire.

492. Construction géométrique du foyer d'un point situé hors de l'axe principal. — D'après ce qu'on vient de voir, pour obtenir, par une construction géométrique, la position du foyer conjugué d'un point donné A, il suffira de construire *un seul* rayon lumineux réfléchi, et de déterminer le point où il coupe l'axe secondaire AB. On pourra donc choisir, un rayon dont la construction soit particulièrement simple. — Considérons, par exemple, parmi les rayons incidents, le rayon AI (*fig.* 324) qui est parallèle à l'axe principal : il viendra passer, après réflexion, par le foyer principal F ; on

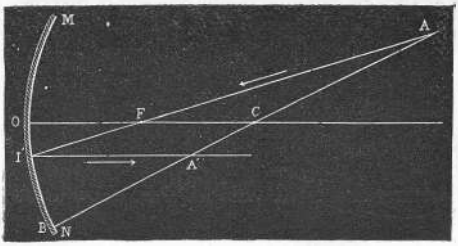


Fig. 324.

(*) Les résultats de cette discussion sont compris dans le tableau de la page 393.

trouvera donc le point A′ en déterminant le point d'intersection de FI avec AB. — On pourra aussi employer le rayon incident AI′ (*fig.* 325) qui passe par le foyer principal F; ce rayon se réfléchit parallèlement à l'axe principal et coupe alors l'axe secondaire au point cherché A′ (*).

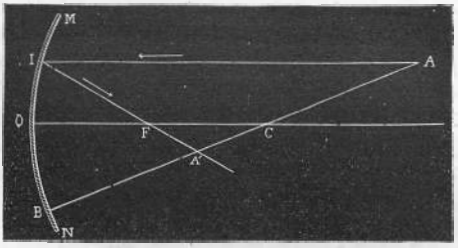


Fig. 325.

493. Droites conjuguées. — Plans conjugués. — Soit MN (*fig.* 326) la section d'un miroir concave par un plan qui passe par l'axe principal; et considérons, dans ce plan, un point Q dont le foyer conjugué, déterminé par l'une ou l'autre des constructions géométriques précédemment indiquées, est le point Q′. Le rayon QA doit se réfléchir suivant AQ′, et la droite AC, normale au miroir au point A, est la bissectrice de l'angle QAQ′. Des points Q et Q′, abaissons des perpendiculaires QP, Q′P′ sur l'axe principal. Les triangles P′Q′A et PQA sont semblables; il en est de même des triangles P′Q′C et PQC; on a donc :

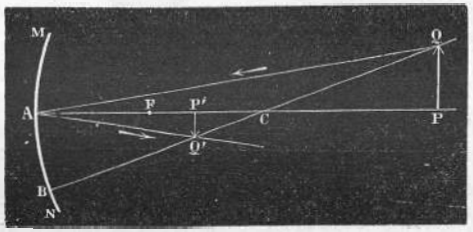


Fig. 326.

$$\frac{Q'P'}{QP} = \frac{AP'}{AP}, \qquad \frac{Q'P'}{QP} = \frac{CP'}{CP},$$

d'où

$$\frac{AP'}{AP} = \frac{CP'}{CP}.$$

La position du point P′ est donc indépendante de la distance PQ; elle ne dépend que de la position du point P. Si l'on suppose que le point lumineux se déplace sur la droite fixe PQ, le foyer conjugué doit se

(*) Dans certains cas, il peut arriver que l'une ou l'autre de ces deux constructions semble en défaut, tantôt parce que le rayon incident employé pour trouver le foyer conjugué n'existe pas, tantôt parce que ce rayon se trouve intercepté avant sa rencontre avec la surface du miroir : il ne faudrait pas pour cela renoncer à ces constructions, qui doivent être regardées comme *purement géométriques*. Les lignes tracées sur la figure, bien que ne représentant plus alors de véritables rayons lumineux, détermineront toujours la position du foyer que l'on cherche.

déplacer sur la droite P′Q′. — Ces droites PQ et P′Q′ sont dites des *droites conjuguées* : tout point lumineux situé sur l'une d'elles a son foyer conjugué sur l'autre.

Si maintenant on fait tourner le plan de la figure autour de l'axe principal, les droites PQ et P′Q′ engendrent deux plans perpendiculaires à l'axe principal, et tout point lumineux situé dans l'un de ces plans a son foyer conjugué dans l'autre plan. Ces plans sont appelés *plans conjugués*. — Puisque le point P′ est le point conjugué du point P, les distances p et p' du sommet du miroir aux deux plans conjugués satisfont à la relation (1) :

$$\frac{1}{p}+\frac{1}{p'}=\frac{1}{f}.$$

494. Construction géométrique de l'image d'une droite perpendiculaire à l'axe principal. — L'image d'un objet est l'ensemble des foyers conjugués de tous ses points. — D'après ce qui précède, l'image d'un objet situé dans un plan perpendiculaire à l'axe principal doit être située dans le plan conjugué du plan de l'objet. Par exemple, l'image de la droite PQ (*fig.* 326) est la droite P′Q′. — D'autre part, les deux triangles APQ et AP′Q′ donnent la relation :

$$\frac{P'Q'}{PQ}=\frac{AP'}{AP};$$

c'est-à-dire que le *rapport des grandeurs linéaires de l'image et de l'objet est égal au rapport des distances du miroir à l'image et à l'objet.*

La construction géométrique qui a été indiquée (492) permet d'ailleurs de déterminer, dans les divers cas, la nature de l'image (réelle ou virtuelle), le sens de l'image (droite ou renversée) et le rapport de grandeur de l'image et de l'objet.

1° Si l'objet rectiligne AB (*fig.* 327) est situé *au delà du centre*,

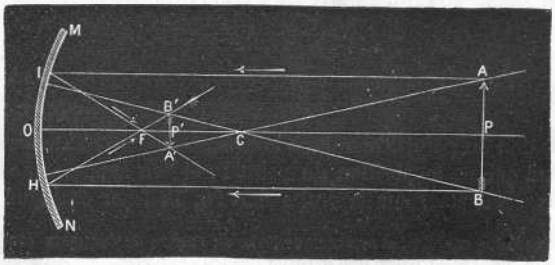


Fig. 327. — Image réelle d'un objet.

on voit, par la construction même, que l'image A′B′ est *réelle*. — De plus, elle est *renversée* par rapport à l'objet, puisque les axes secon-

daires des extrémités A et B se croisent au centre C. — Enfin, dans le cas actuel, P'O étant plus petit que PO, l'image est *plus petite que l'objet*.

Si l'on suppose que l'objet AB *se rapproche du centre*, les axes secondaires des extrémités de l'objet s'écartent l'un de l'autre; or, les foyers conjugués de ces points sont toujours déterminés par les intersections de ces axes avec les rayons réfléchis IF et IIF; dès lors l'image *grandit*, tout en restant *plus petite que l'objet*, et se rapproche du centre (*).

2° Si l'objet AB (*fig.* 328) est situé dans un plan perpendiculaire à l'axe principal et passant *par le centre*, l'axe secondaire du point A ne rencontrant plus le miroir, la construction géométrique paraît en défaut. Mais on peut déterminer le foyer conjugué de ce point par l'intersection de deux rayons réfléchis, savoir : d'une part, celui qui provient du rayon incident AM parallèle à l'axe principal, et qui passe, après réflexion, par le foyer principal F ; d'autre part, celui qui provient du rayon incident AF mené par le foyer principal, et qui est réfléchi parallèlement à l'axe OC. Il est facile de voir que leur intersection A' est symétrique de A par rapport à l'axe principal (**). On déterminerait de même le foyer conjugué B' du point B. — Cette construction montre que l'image A'B' est *réelle*, *renversée*, *égale à l'objet* et *symétriquement placée par rapport à l'axe principal*.

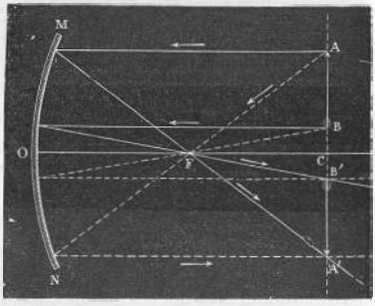


Fig. 328. — Image réelle égale à l'objet.

3° Si l'objet AB est placé *entre le centre et le foyer principal*, on trouvera, en répétant la construction géométrique (492), que l'image est située *au delà du centre* : qu'elle est *réelle*, *renversée* et *plus grande que l'objet*. — On verra facilement que, plus l'objet s'approche du foyer, plus cette image grandit en s'éloignant du miroir.

4° Si l'objet AB coupe l'axe principal au *foyer principal* F (*fig.* 329), l'axe secondaire du point A et le rayon réfléchi IF doivent être considérés comme parallèles, pourvu que l'ouverture du miroir soit très petite : en effet AI devient alors égal à OF, et par suite à FC; la figure AIFC est donc un parallélogramme. Il en résulte que IF, qui, par son inter-

(*) L'objet et l'image sont toujours compris entre deux droites, AA' et BB', qui se coupent au centre : c'est ce qu'on exprime en disant que, dans chaque cas particulier, un objet et son image *seraient vus du centre sous des angles égaux*. — Il est facile de voir que le *sommet* du miroir jouit de la même propriété (*fig.* 326). — Mais le centre et le sommet sont les deux seuls points pour lesquels il en soit ainsi.

(**) On devait s'attendre à trouver le point A' sur le prolongement de la perpendiculaire AC, car cette perpendiculaire est ici l'axe secondaire du point A.

section avec AC, devait déterminer le foyer conjugué du point A, ne rencontre AC ni en avant ni en arrière du miroir. Dans ce cas, il n'y a donc *pas d'image* (*).

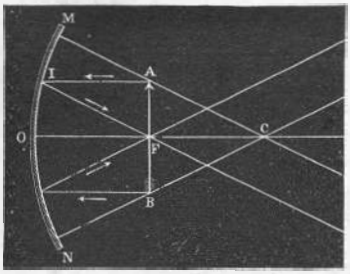


Fig. 329.

5° Supposons enfin que l'objet AB soit situé *entre le foyer principal et le miroir* (*fig.* 330). En menant encore l'axe secondaire du point A, et le rayon AI qui émane de ce point parallèlement à l'axe principal et se réfléchit suivant IF, on forme un trapèze AIFC, dans lequel le côté AI est plus petit que FC, puisqu'il est moindre que OF : le rayon réfléchi IF, prolongé en avant du miroir, ne rencontre donc pas l'axe secondaire du point A. Mais les prolongements de ces deux directions se rencontrent derrière le miroir, en un point A', qui est le foyer conjugué *virtuel* du point A. On déterminerait de même le point B'. — On voit donc que, dans ce cas, l'image est *virtuelle*, *droite* et *plus grande que l'objet*. — A mesure que l'objet se rapproche du miroir, l'image s'en rapproche également et diminue de grandeur.

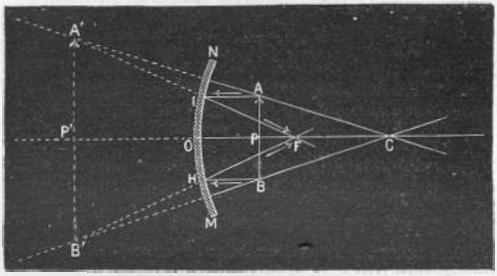


Fig. 330. — Image virtuelle.

495. Détermination analytique de la position, de la nature, du sens et de la grandeur de l'image. — Tous ces résultats peuvent encore se déduire analytiquement de la discussion de la relation entre les distances conjuguées (490).

Et d'abord, l'objet étant supposé dans un plan perpendiculaire à l'axe principal, son image est située dans le plan conjugué (495) ; sa *position*, caractérisée par la distance p' de ce plan au miroir, est donnée par l'équation

$$(1) \qquad \frac{1}{p} + \frac{1}{p'} = \frac{1}{f}.$$

(*) En considérant cette position de l'objet comme la limite des positions, qu'il peut prendre lorsqu'il s'approche indéfiniment du foyer principal, on dit quelquefois que l'image est alors *infiniment éloignée du miroir* et *infiniment agrandie*.

Selon que la valeur de p', tirée de cette équation, est *positive* ou *négative*, l'image est *réelle* ou *virtuelle*.

De plus, l'image d'un point du contour de l'objet est sur l'axe secondaire qui passe par ce point ; l'image du contour de l'objet, c'est-à-dire le contour de l'image, est donc déterminée par l'intersection du plan conjugué avec le cône dont le sommet est le centre du miroir, et dont la base est le contour de l'objet. — Si les deux plans conjugués sont du même côté du centre, ils coupent la même nappe du cône, et alors l'image est *droite* : c'est ce qui arrive lorsque, l'objet étant placé entre le miroir et son foyer principal, l'image est derrière le miroir (*fig.* 330) : dans ce cas, p' est négatif. — Si les deux plans conjugués sont de part et d'autre du centre, l'un d'eux coupe l'une des nappes du cône ; l'autre, la nappe opposée (*fig.* 327), et alors l'image est *renversée* : c'est ce qui arrive lorsque, l'objet étant situé au delà du foyer du miroir, l'image est en avant du miroir ; dans ce cas, p' et p sont tous deux positifs. — En résumé, selon que, en résolvant l'équation (1), on trouve que le rapport $\frac{p'}{p}$ est *positif* ou *négatif*, on en doit conclure que l'image est *renversée* ou *droite*.

Enfin, le rapport de deux dimensions linéaires correspondantes de l'image et de l'objet est égal à la valeur absolue du rapport des distances du miroir à l'image et à l'objet (494) ; on aura donc, en désignant par i et o deux *dimensions homologues* de l'image et de l'objet,

$$\frac{i}{o} = \sqrt{\frac{p'^2}{p^2}}. \qquad (2)$$

L'image est donc *plus grande* ou *plus petite* que l'objet, selon que $\frac{p'^2}{p^2}$ est *supérieur* ou *inférieur* à l'unité.

On voit donc que la résolution de l'équation (1), en faisant connaître p', $\frac{p'}{p}$ et $\frac{p'^2}{p^2}$, détermine la *position*, la *nature* (réelle ou virtuelle), le *sens* et la *grandeur* de l'image.

Tous ces résultats sont résumés dans le tableau suivant :

$p = \infty$	$p' = f$	image réelle,	renversée,	infiniment diminuée
$\infty > p > 2f$	$f < p' < 2f$	— réelle,	renversée,	diminuée.
$p = 2f$	$p' = 2f$	— réelle,	renversée,	égale.
$2f > p > f$	$2f < p' < \infty$	— réelle,	renversée,	agrandie.
$p = f$	$p' = \pm\infty$	— { réelle, / virtuelle,	renversée, / droite.	infiniment agrandie.
$f > p > 0$	$p' < 0$	— virtuelle,	droite,	agrandie.

496. Vérifications expérimentales. — Devant un miroir sphérique concave, on dispose une bougie, de manière que le milieu de la flamme P se trouve à peu près sur l'axe principal du miroir. A l'aide d'un petit écran de papier, on cherche le lieu où l'image se forme avec le

plus de netteté. — On constate alors les résultats suivants, qui vérifient tous les résultats compris dans le tableau ci-dessus :

1° La bougie P étant d'abord placée très loin du miroir (*fig.* 331), l'image P′ se forme très près du foyer principal F ; elle est renversée, très petite et très brillante. — Si l'on rapproche graduellement la bougie du centre C, l'image s'en rapproche en sens inverse ; elle grandit, mais en restant toujours plus petite que l'objet.

2° Lorsqu'on atteint le centre, en ayant soin d'abaisser suffisam-

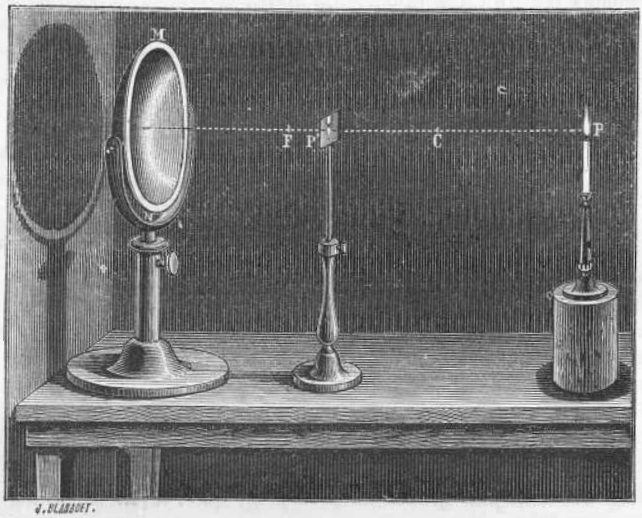


Fig. 331. — Image réelle, plus petite que l'objet.

ment la flamme au-dessous de l'axe, on peut constater que l'image, toujours renversée, se trouve à la même distance du miroir, et qu'elle est égale en grandeur à l'objet (*).

3° Quand la bougie P arrive entre le centre et le foyer F (*fig.* 332), l'image P′ se forme au delà du centre C ; elle est encore renversée, mais plus grande que l'objet ; elle est d'autant plus grande et d'autant plus éloignée du miroir, que la flamme se rapproche davantage du foyer principal.

4° Quand la bougie atteint le foyer principal, l'image disparaît ; les rayons issus de chacun des points de la flamme forment, après réflexion, un faisceau parallèle.

(*) On donne quelquefois une autre forme à cette expérience. Au-dessous du centre d'un grand miroir concave, et dans une salle bien éclairée, on suspend un bouquet de fleurs, dans une position *renversée*. Les personnes placées à quelque distance, en avant du miroir, aperçoivent alors, au-dessus du centre, une image aérienne et *droite* de ce bouquet.

5° Enfin, quand la bougie arrive entre le foyer F et le miroir (*fig.* 353),

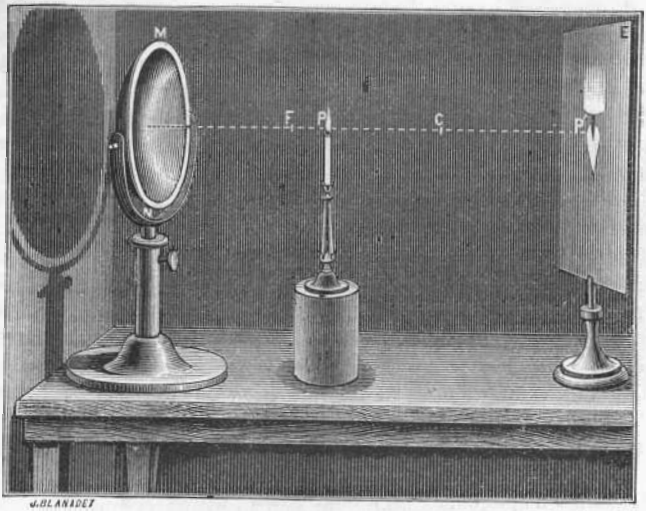


Fig. 352. — Image réelle, plus grande que l'objet.

un observateur placé en avant du miroir voit apparaître, derrière le miroir, une image virtuelle, droite et agrandie ; cette image, d'abord très grande et très éloignée, se rapproche et diminue progressivement, à mesure qu'on approche la bougie de la surface du miroir. — Cette expérience explique l'usage qu'on fait des miroirs concaves, comme *miroirs grossissants*.

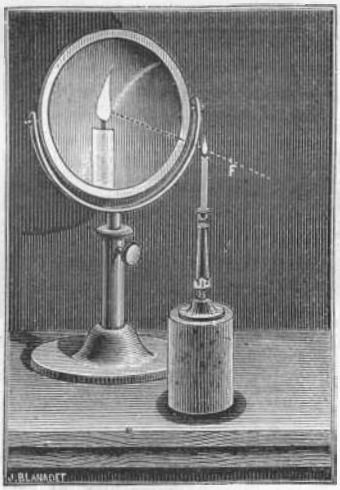


Fig. 353. — Image virtuelle.

497 Observation des images réelles, sans l'emploi d'écrans. — Images aériennes. — Dans les expériences précédentes, pour constater la production d'une image réelle, nous avons employé un écran, que nous placions au point où l'image apparaissait avec le plus de netteté : elle était alors *visible de tous les points de l'espace environnant*, parce que les points de l'écran qui étaient éclairés diffusaient de la lumière dans toutes les directions.

On peut encore percevoir la formation d'une image *réelle* sans employer d'écran. En effet, les rayons émis par un point A de l'objet (*fig.* 323) donnent naissance, après réflexion, à un cône de rayons convergents, ayant pour base le miroir et pour sommet le point A′ : donc, si l'on supprime l'écran, ces rayons, continuant leur marche au delà de A′, forment un cône de rayons *divergents*, dont les arêtes sont dans le prolongement de celles du cône précédent. Dès lors, *si l'œil de l'observateur est placé à l'intérieur de ce dernier cône*, il recevra de la lumière dans les mêmes conditions que si le point A′ appartenait à un objet lumineux. L'observateur verra de même les autres points de l'image, pourvu que son œil soit placé dans la région commune aux divers cônes ayant ces divers points pour sommets. — Cette région est généralement assez étendue pour que plusieurs observateurs puissent voir simultanément l'image, en se plaçant à une distance suffisante.

Il est intéressant d'observer la formation de ces *images aériennes*. Elles offrent absolument l'aspect d'objets lumineux, mais elles ne sont visibles que *pour des positions déterminées de l'œil*. — Nous verrons que les images aériennes jouent un rôle essentiel dans la plupart des instruments d'optique.

498. Miroirs sphériques convexes. — Foyer principal virtuel. — Soit MOM′ (*fig.* 334) la section d'un miroir sphérique *convexe*, par

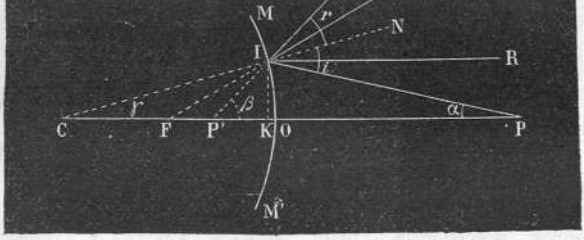


Fig. 334. — Foyers virtuels, produits par un miroir sphérique convexe.

un plan mené par l'axe principal, et considérons un rayon lumineux RI parallèle à l'axe; il se réfléchit suivant IS, en faisant avec la normale CIN, un angle de réflexion SIN égal à l'angle d'incidence RIN. Le prolongement géométrique du rayon réfléchi IS rencontre cet axe en un point F, situé derrière le miroir. — Un raisonnement semblable à celui que nous avons fait pour les miroirs concaves (486) montre que, pour un miroir convexe de très petite ouverture, le point F est à égale

distance du centre C et du sommet O du miroir. Donc, *tous les rayons parallèles à l'axe principal se réfléchissent de manière que leurs prolongements géométriques passent par un point situé sur l'axe, sensiblement à égale distance du centre et du sommet.* — Ce point F est le *foyer principal* du miroir; c'est un foyer *virtuel*.

499. Foyers des points situés sur l'axe principal d'un miroir convexe. — Si maintenant on considère un rayon PI (*fig.* 334), émané d'un point P situé sur l'axe principal, ce rayon se réfléchit suivant une direction IT faisant avec la normale un angle TIN plus grand que SIN : le prolongement géométrique du rayon réfléchi rencontre donc l'axe principal en un point P′ situé entre le foyer principal F et le sommet O. — Désignons toujours par α, β et γ les angles IPO, IP′O et ICO ; par i et r les angles d'incidence et de réflexion. On a : $i = \alpha + \gamma$, $r = \beta - \gamma$, en remarquant que l'angle de réflexion est égal à l'angle P′IC; et comme $i = r$, il vient

$$\beta - \alpha = 2\gamma.$$

En raisonnant comme précédemment (488), on obtient la relation

$$\frac{1}{\overline{P'O}} - \frac{1}{\overline{OP}} = \frac{2}{\overline{CO}}.$$

La position du point P′ est donc indépendante de la position du point d'incidence I, pourvu que l'ouverture du miroir soit très petite. — Donc, *tout point lumineux situé sur l'axe principal d'un miroir convexe a un foyer virtuel, situé derrière le miroir, entre le foyer principal et le sommet.*

Inversement, si l'on fait tomber sur un miroir convexe des rayons convergents, tels que TI, dont les prolongements géométriques aillent rencontrer l'axe principal en un point P′, situé entre le foyer principal et le sommet O, les rayons réfléchis vont former un foyer *réel* P sur l'axe principal; les points P et P′ doivent donc être considérés comme des *foyers conjugués*.

500. Images produites par les miroirs sphériques convexes. — Si l'on continue à appliquer aux miroirs convexes les raisonnements qui ont été faits pour les miroirs concaves, on voit que *tout point lumineux situé en dehors de l'axe principal a un foyer conjugué virtuel, situé sur son axe secondaire*, c'est-à-dire sur la droite qui joint ce point lumineux au centre du miroir. Ce foyer conjugué peut donc être obtenu en construisant géométriquement un seul rayon réfléchi, et en déterminant le point où l'axe secondaire est coupé par ce rayon ou par son prolongement; c'est ce que nous allons montrer sur un exemple.

Soit AB (*fig.* 335) un objet rectiligne, placé devant un miroir convexe MN. Pour trouver le foyer conjugué du point A, traçons l'axe secondaire AC, et considérons un rayon AI parallèle à l'axe principal :

ce rayon se réfléchit suivant une direction IS, telle que son prolongement géométrique passe au foyer principal virtuel F (498). Ce prolongement rencontre l'axe secondaire AC au point A′, qui est l'image virtuelle du point A. On obtiendra de même l'image B′ du point B : les autres points de la droite AB auront leurs images placées sur la droite A′B′, entre A′ et B′.

Cette construction montre qu'un miroir convexe donne toujours une image *virtuelle, droite, et diminuée*, d'un objet placé devant lui. —

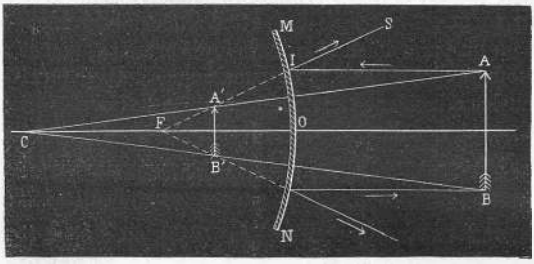


Fig. 333. — Image virtuelle, produite par un miroir sphérique convexe.

Il est d'ailleurs facile de voir que cette image est *d'autant plus petite et d'autant plus rapprochée du foyer principal que l'objet est lui-même plus loin du miroir* (*).

501. Détermination expérimentale de la distance focale principale d'un miroir sphérique. — 1° *Miroir concave.* — On obtient immédiatement la distance focale principale d'un miroir sphérique concave, en orientant ce miroir de façon que son axe principal soit dirigé vers un point lumineux très éloigné, par exemple vers le centre du soleil. On cherche, à l'aide d'un petit écran, l'endroit où l'image se forme avec le plus de netteté; on obtient ainsi le foyer principal, dont il ne

(*) En désignant, comme on l'a fait pour les miroirs concaves, par p et p' les distances OP et OP′ (*fig.* 334) du miroir à un point et à son image, et par R le rayon de courbure du miroir, la relation $\frac{1}{PO}-\frac{1}{OP}=\frac{2}{CO}$ donne $\frac{1}{p'}-\frac{1}{p}=\frac{2}{R}$.

Si l'on fait $p=\infty$, on trouve $p'=\frac{R}{2}$; en désignant par f la distance focale principale, $f=\frac{R}{2}$, la relation précédente devient :

$$\frac{1}{p'}-\frac{1}{p}=\frac{1}{f}. \qquad (1)$$

On a d'ailleurs toujours, entre la grandeur de l'image et celle de l'objet, la relation

$$\frac{i}{o}=\sqrt{\frac{p'^2}{p^2}}. \qquad (2)$$

La discussion de ces expressions fournira, comme précédemment (495), tous les rapports de grandeur et de position de l'image et de l'objet.

reste plus qu'à mesurer la distance au sommet du miroir. — Le double de la distance focale ainsi trouvée est le rayon du miroir.

2° *Miroir convexe.* — On dirige encore l'axe principal du miroir vers le soleil, et l'on place, en avant de la surface réfléchissante MN (*fig.* 336), un écran perpendiculaire à l'axe et percé de deux ouvertures A, A′. Ces deux ouvertures laissent passer deux faisceaux de rayons solaires AI, A′I′, qui tombent sur le miroir et produisent deux faisceaux réfléchis IR, I′R′ ; on obtient ainsi sur l'écran deux surfaces éclairées R,R′, et l'on approche ou l'on écarte l'écran du miroir, jusqu'à ce que la distance de ces petites surfaces soit *double* de celle des ouvertures A,A′. Lorsque ce résultat est atteint, les prolongements des rayons réfléchis allant toujours passer sensiblement par le foyer principal virtuel F, on a sensiblement FP = 2FO. Par suite, il suffit de mesurer la distance du miroir à l'écran, pour avoir la distance focale principale. — Le rayon du miroir est le double de cette distance.

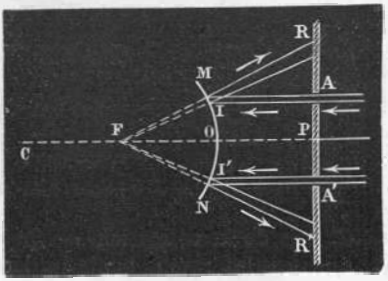


Fig. 336.

CHAPITRE III

RÉFRACTION DE LA LUMIÈRE

I. — PRINCIPES GÉNÉRAUX.

502. Lois de la réfraction. — On appelle *réfraction*, la déviation que subissent les rayons lumineux lorsque, rencontrant obliquement la surface de séparation de deux milieux transparents, ils passent de l'un de ces milieux dans l'autre. — Ainsi, lorsqu'un rayon lumineux SI (*fig.* 357) rencontre obliquement la surface d'une nappe d'eau AB, ce rayon, au lieu de suivre sa direction primitive IS′, prend une direction différente IR.

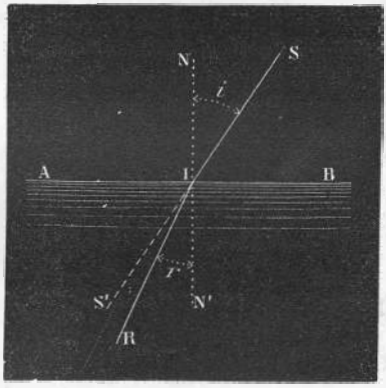


Fig. 357.

On nomme *plan d'incidence*, le plan mené par le rayon insident SI et la normale IN; *angle d'incidence*, l'angle *i* que forme le rayon incident avec la normale; *angle de réfraction* l'angle *r* que forme le rayon réfracté avec la normale. — Lorsque l'angle de réfraction est *plus petit* que l'angle d'incidence, on dit que le second milieu est *plus réfringent* que le premier; dans le cas contraire, on dit qu'il est *moins réfringent*. — En général, de deux corps transparents, *le plus dense* est aussi le plus réfringent; cette règle offre cependant quelques exceptions.

La réfraction est soumise aux deux lois suivantes, connues sous le nom de lois de Descartes :

1° *Le rayon réfracté reste dans le plan d'incidence.*

2° *Le rapport du sinus de l'angle d'incidence au sinus de l'angle de réfraction est constant pour les mêmes milieux*, quelle que soit la valeur de l'angle d'incidence.

503. Vérification expérimentale. — Pour vérifier ces lois, on peut employer l'appareil de Silberman, déjà décrit (473), en y adaptant, au lieu du miroir A, une auge cylindrique, limitée par deux plans de verre (*fig.* 338) ; on verse de l'eau jusqu'à la hauteur du centre C du cercle, et, au moyen du petit miroir *m*, on fait arriver un faisceau de lumière qui, passant par l'ouverture *i*, vienne tomber à la surface de l'eau en C. — On remarquera que le faisceau lumineux, après s'être réfracté en pénétrant dans l'eau, se propage suivant un rayon du cercle ; dès lors, il se présente, pour sortir de l'eau, suivant un angle d'incidence nul : il ne subit donc pas de nouvelle déviation à l'émergence. — L'appareil permet donc d'étudier la déviation produite uniquement par le passage de l'air dans l'eau.

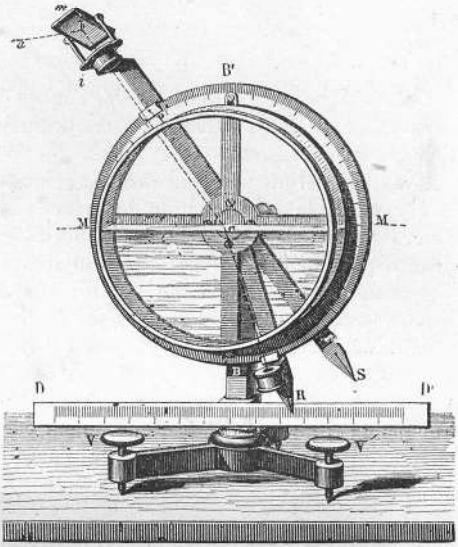


Fig. 558.
Appareil de Silbermann, pour les lois de la réfraction

On constate d'abord qu'il est toujours possible de donner à l'alidade R une position telle, que le faisceau réfracté vienne passer par l'ouverture *i'* ; ce faisceau reste donc *dans le plan d'incidence*, qui est parallèle au plan du cercle. — Pour mesurer les sinus des angles d'incidence et de réfraction, on fait mouvoir la règle horizontale DD' le long du support vertical de l'appareil, de façon qu'elle vienne toucher l'extrémité S de l'alidade qui porte l'ouverture *i* : la longueur comptée sur cette règle, entre S et le diamètre vertical BB', mesure le sinus de l'angle SCB, dans le cercle de rayon CS ; c'est le *sinus de l'angle d'incidence*, puisque l'angle SCB est égal à *i*CB', comme opposé par le sommet. On amène ensuite la règle en contact avec l'extrémité R de l'autre alidade, dont la longueur CR est égale à CS, et l'on mesure ainsi le sinus de l'angle de réfraction, dans le cercle de même rayon. On trouve que, quel que soit l'angle d'incidence, le *rapport* de ces deux sinus est toujours égal à $\frac{4}{3}$.

504. Indices de réfraction. — On appelle *indice de réfraction* d'une substance par rapport à une autre, le rapport constant *n* du sinus de

l'angle d'incidence i au sinus de l'angle de réfraction r, pour un rayon lumineux passant de la seconde substance dans la première. La quantité n est donc définie par la relation

$$\frac{\sin i}{\sin r} = n.$$

D'après l'expérience qui précède, l'indice de réfraction de l'eau par rapport à l'air est $\frac{4}{3}$. — Pour le verre ordinaire, l'indice par rapport à l'air est environ $\frac{3}{2}$, etc.

Nous indiquerons plus loin (520) le principe de l'une des méthodes qui servent à la détermination des indices de réfraction par rapport à l'air, et les valeurs de ces indices pour les corps solides ou liquides le plus fréquemment employés. — Ces indices sont tous représentés par des nombres plus grands que l'unité; c'est-à-dire que tous les corps solides ou liquides sont *plus réfringents que l'air* (*).

505. Construction géométrique d'Huyghens. — La théorie des ondulations a conduit Huyghens à la construction géométrique suivante, qui donne la direction du rayon réfracté, quand on connaît l'indice de réfraction n du second milieu par rapport au premier.

Soit AB (*fig.* 339) la surface de séparation, que nous supposons

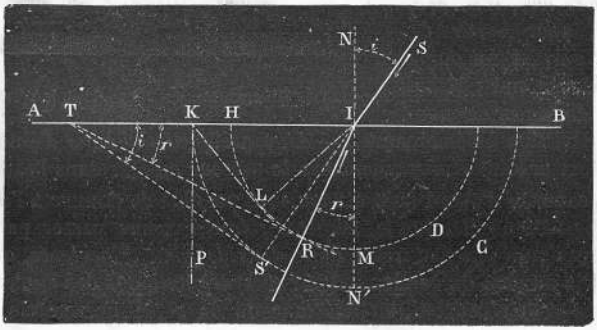


Fig. 339. — Construction d'Huyghens.

plane; soient SI le rayon incident, et NN' la normale. Prenons une unité de longueur quelconque et, du point I comme centre, décrivons, à l'intérieur du second milieu : 1° une demi-circonférence C, avec un rayon égal à 1; 2° une demi-circonférence D, avec un rayon égal à $\frac{1}{n}$. Par le point S', où le prolongement de SI rencontre la première, menons une

(*) Lorsqu'on répète ces mêmes déterminations en faisant en sorte que la lumière passe, non plus de l'air dans l'eau ou dans le verre, mais *du vide* dans ces mêmes milieux, on trouve des nombres qui diffèrent peu des précédents, et qu'on peut appeler ndices de réfraction par rapport au vide, ou *indices absolus*.

tangente S'T; par le point T, où cette droite rencontre la surface de séparation AB, menons une tangente à la seconde; soit R le point de contact, et joignons IR : la droite IR représente la direction du rayon réfracté. — En effet, i étant l'angle d'incidence NIS, si l'on désigne par r l'angle N'IR, on a, en remarquant que les deux tangentes sont respectivement perpendiculaires aux rayons passant par les points de contact, $\mathrm{ITS'} = i$, $\mathrm{ITR} = r$, et les deux triangles TIS', TIR donnent

$$\mathrm{TI} = \frac{1}{\sin i} = \frac{\left(\frac{1}{n}\right)}{\sin r}; \quad \text{d'où l'on tire} \quad \sin r = \frac{\sin i}{n};$$

l'angle r, déterminé par cette construction, est donc bien l'angle de réfraction, et la direction IR est bien celle du rayon réfracté.

Cette construction d'Huyghens montre immédiatement comment varie l'angle S'IR, qui représente la *déviation* du rayon réfracté, quand on fait varier l'angle d'incidence i. — En effet, si l'on fait varier i de zéro à 90°, le point S' se déplace, sur l'arc N'K, depuis N' jusqu'à K; par suite, le point R se déplace, sur l'arc MH, depuis M jusqu'au point de contact L de la tangente KL; donc l'angle de réfraction r varie depuis zéro jusqu'à la valeur MIL, ou IKL. (On voit que cet angle, que nous appellerons l'*angle limite*, a pour sinus $\frac{1}{n}$.) — Or l'angle de *déviation* S'IR, ou $i - r$, pour une valeur quelconque de i, est toujours égal à l'angle S'TR des deux tangentes : quand le sommet T de cet angle se déplace sur IA, depuis l'infini jusqu'au point K, cet angle va constamment en croissant depuis zéro jusqu'à la valeur LKP. Donc, quand l'angle d'incidence augmente, *la déviation va constamment en croissant*, depuis zéro jusqu'à une valeur déterminée. (On voit que cette valeur limite LKP de l'angle de déviation a son sinus égal à cos IKL, c'est-à-dire à $\sqrt{1 - \frac{1}{n^2}}$.)

506. Réfraction par une lame à faces parallèles. — Principe du retour inverse des rayons. — Lorsqu'on place une lame de verre à faces parallèles entre l'œil et un objet éloigné, comme une étoile, l'observation montre que la direction dans laquelle on voit cet objet n'est pas changée. Il en résulte que chaque rayon émergent I'S' (*fig.* 340) est parallèle au rayon incident SI dont il provient (*). — Dès lors, l'angle d'émergence N'I'S' est égal à l'angle d'incidence NIS : soit i la valeur commune de ces deux angles. Soit r la valeur commune des angles PII' et P'I'I, égaux comme alternes-internes. Soient n l'indice de

(*) C'est ce qu'on peut vérifier encore, d'une manière grossière, en faisant passer, dans une chambre obscure, un faisceau de lumière solaire au travers d'une lame à faces parallèles, et comparant la direction du faisceau émergent à la direction du faisceau incident.

réfraction du verre par rapport à l'air, et n' l'indice de l'air par rapport au verre. Le passage de l'air dans le verre, en I, donne

$$\sin i = n \sin r;$$

le passage du verre dans l'air, en I′, donne

$$\sin r = n' \sin i.$$

De ces deux équations, on tire

$$n' = \frac{1}{n},$$

c'est-à-dire que l'indice de l'air par rapport au verre est l'*inverse* de l'indice du verre par rapport à l'air.

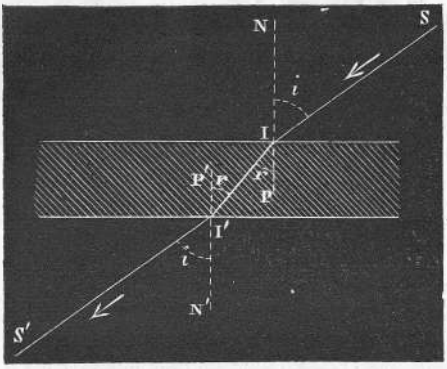


Fig. 340.
Réfraction par une lame à faces parallèles.

Il résulte de là que, si un rayon, passant de l'air dans le verre, se réfracte suivant une certaine direction, un rayon qui suivrait cette même direction en sens inverse se réfractera, en passant du verre dans l'air, *suivant la direction du rayon incident primitif*. — Ce résultat n'est qu'un cas particulier du principe qui est connu sous le nom de *retour inverse des rayons lumineux*. Ce principe peut s'énoncer de la manière suivante : En général, si, en traversant des milieux déterminés, un rayon lumineux suit une certaine route, un rayon se propageant en sens inverse suit *la même route* que le premier.

507. Cas où la lumière passe d'un milieu dans un autre milieu plus réfringent. — Lorsque des rayons lumineux se présentent pour passer d'un milieu dans un autre milieu *plus réfringent*, par exemple de l'air dans un corps solide ou liquide, l'expérience montre *qu'il y a toujours des rayons transmis*, quel que soit l'angle d'incidence. — La loi de Descartes permet d'ailleurs toujours de déterminer la direction des rayons réfractés.

Soit, par exemple, un rayon NI (*fig.* 341), tombant sur la surface de l'eau dans la direction même de la normale. On a, pour ce rayon, $i = 0$; par suite, $r = 0$, c'est-à-dire que le rayon pénètre dans l'eau *sans déviation*, suivant IN′. — Pour un rayon quelconque SI, tombant au même point I, sous un angle d'incidence i, la loi de Descartes donne :

$$\sin r = \frac{\sin i}{n};$$

comme sin i ne peut pas être plus grand que l'unité, le second membre de l'équation est toujours moindre que 1; donc, quel que soit i, il

existe un angle r, dont le sinus satisfait à cette équation, et qui définit la direction IR du rayon réfracté. — A mesure que l'angle i augmente, l'angle r augmente aussi, et, de plus, comme le montre la construction d'Huyghens (505), la déviation va en augmentant. — Enfin, pour un rayon qui tomberait dans une direction *rasante* BI, on aurait $i = 90^{0}$, c'est-à-dire sin $i = 1$; par suite, sin $r = \frac{1}{n}$ ou, dans le cas actuel, sin $r = \frac{3}{4}$, ce qui donne pour la valeur de r environ 48 degrés. On obtient ainsi la direction du rayon réfracté IT, correspondant au rayon incident BI, et la *déviation* est représentée par AIT.

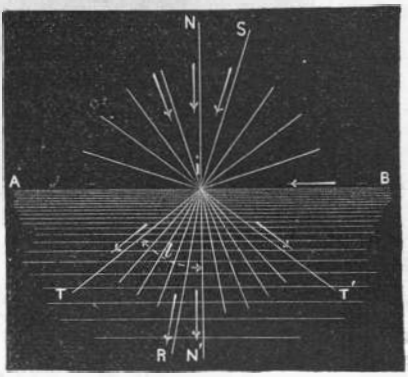


Fig. 341.
Passage de la lumière, de l'air dans l'eau.

Dès lors, pour tous les rayons incidents qui tombent au point I, les rayons réfractés sont compris à l'intérieur du cône TIT′, qu'on obtiendrait en faisant tourner l'angle TIN′ autour de la normale IN′. — Nous venons de voir que, pour l'eau, la valeur de cet angle est d'environ 48 degrés. Pour une substance quelconque, c'est toujours l'angle dont le sinus est égal à $\frac{1}{n}$.

Mais il est essentiel de remarquer que les divers rayons réfractés ne conservent pas, en égale proportion, *l'intensité lumineuse* des rayons incidents. — En effet, nous avons vu (479) que, quand un rayon lumineux tombe sur la surface d'un corps transparent, la proportion de lumière *réfléchie* augmente avec l'angle d'incidence; par suite, la proportion de lumière *réfractée* diminue à mesure que l'angle d'incidence augmente. En d'autres termes, l'intensité lumineuse du rayon réfracté IN′ (*fig.* 341) est presque égale à celle du rayon incident NI, tandis que l'intensité des rayons réfractés voisins de IT est presque nulle.

508. Cas inverse. — Angle limite. — Réflexion totale. — Considérons maintenant le cas inverse, où des rayons se présentent pour passer d'un milieu dans un autre milieu *moins réfringent*. — Nous allons voir que, dans certains cas, ce passage devient impossible.

Soit un point lumineux O (*fig.* 342), situé dans l'eau et émettant des rayons vers sa surface. — Le rayon OP, qui tombe dans une direction normale à la surface de l'eau, sort *sans déviation*, suivant PQ, et son intensité lumineuse est *sensiblement égale* à celle du rayon incident. —

existe un angle r, dont le sinus satisfait à cette équation, et qui définit la direction IR du rayon réfracté. — A mesure que l'angle i augmente, l'angle r augmente aussi, et, de plus, comme le montre la construction d'Huyghens (505), la déviation va en augmentant. — Enfin, pour un rayon qui tomberait dans une direction *rasante* BI, on aurait $i = 90°$, c'est-à-dire sin $i = 1$; par suite, sin $r = \frac{1}{n}$ ou, dans le cas actuel, sin $r = \frac{3}{4}$, ce qui donne pour la valeur de r environ 48 degrés. On obtient ainsi la direction du rayon réfracté IT, correspondant au rayon incident BI, et la *déviation* est représentée par AIT.

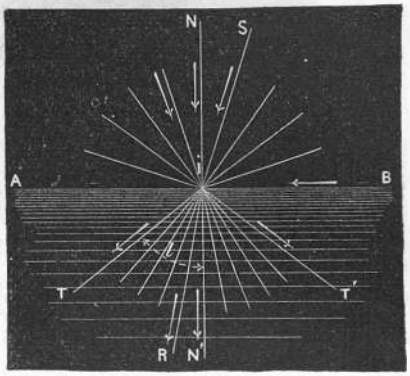


Fig. 341.
Passage de la lumière, de l'air dans l'eau.

Dès lors, pour tous les rayons incidents qui tombent au point I, les rayons réfractés sont compris à l'intérieur du cône TIT', qu'on obtiendrait en faisant tourner l'angle TIN' autour de la normale IN'. — Nous venons de voir que, pour l'eau, la valeur de cet angle est d'environ 48 degrés. Pour une substance quelconque, c'est toujours l'angle dont le sinus est égal à $\frac{1}{n}$.

Mais il est essentiel de remarquer que les divers rayons réfractés ne conservent pas, en égale proportion, *l'intensité lumineuse* des rayons incidents. — En effet, nous avons vu (479) que, quand un rayon lumineux tombe sur la surface d'un corps transparent, la proportion de lumière *réfléchie* augmente avec l'angle d'incidence ; par suite, la proportion de lumière *réfractée* diminue à mesure que l'angle d'incidence augmente. En d'autres termes, l'intensité lumineuse du rayon réfracté IN' (*fig.* 341) est presque égale à celle du rayon incident NI, tandis que l'intensité des rayons réfractés voisins de IT est presque nulle.

508. Cas inverse. — Angle limite. — Réflexion totale. — Considérons maintenant le cas inverse, où des rayons se présentent pour passer d'un milieu dans un autre milieu *moins réfringent*. — Nous allons voir que, dans certains cas, ce passage devient impossible.

Soit un point lumineux O (*fig.* 342), situé dans l'eau et émettant des rayons vers sa surface. — Le rayon OP, qui tombe dans une direction normale à la surface de l'eau, sort *sans déviation*, suivant PQ, et son intensité lumineuse est *sensiblement égale* à celle du rayon incident. —

Un rayon OR, qui tombe sur la surface de l'eau suivant un angle d'incidence assez petit, sort de l'eau *en s'écartant de la normale.* Si l'on

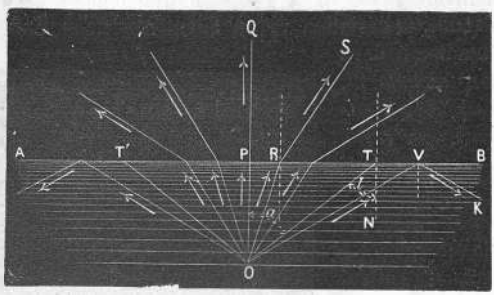


Fig. 342. — Passage de l'eau dans l'air. — Angle limite. — Réflexion totale.

désigne toujours par n l'indice de réfraction de l'eau par rapport à l'air, l'indice *de l'air par rapport à l'eau* est $\frac{1}{n}$, et la direction RS du rayon réfracté est donnée par la relation $\frac{\sin i}{\sin r} = \frac{1}{n}$, ou $\sin r = n \sin i$. L'intensité lumineuse de ce rayon RS est moindre que celle du rayon incident OR, une portion de la lumière incidente étant réfléchie vers la partie inférieure. — Si maintenant on considère des rayons incidents qui s'écartent de plus en plus de la direction OP, la relation $\sin r = n \sin i$ ne peut fournir de valeur réelle pour r que si la valeur de $\sin i$ n'est pas supérieure à $\frac{1}{n}$, ou dans le cas actuel, si l'angle d'incidence i n'est pas supérieur à 48 degrés. Désignons en général par l, pour une substance quelconque, l'angle dont le sinus est égal à $\frac{1}{n}$; la réfraction ne sera possible que pour les rayons dont l'angle d'incidence sera inférieur à cet *angle limite.*

L'expérience montre, en effet, que, pour des rayons s'écartant de plus en plus de la direction OP, la déviation devient de plus en plus grande, jusqu'à ce qu'on arrive à un rayon incident OT dont l'angle d'incidence est égal à l, et qui sort de l'eau *en rasant la surface,* suivant TB (la relation précédente donne, pour ce rayon, $\sin r = 1$, ou $r = 90^0$). L'intensité lumineuse de ce rayon émergent TB est d'ailleurs presque nulle, la plus grande partie de la lumière étant réfléchie. — Enfin, pour tout rayon incident OV tombant sous une incidence plus grande, il y a *réflexion totale,* c'est-à-dire que toute la lumière du rayon incident se retrouve dans le rayon réfléchi VK, et aucune partie de cette lumière ne sort du liquide.

Il en est ainsi pour tous les rayons émis par le point O en dehors du

cône que l'on obtiendra en faisant tourner l'angle TOP autour de la normale OP. Cet angle TOP, ou *a*, est égal à l'angle d'incidence OIN ou *i*, puisque ces deux angles sont alternes-internes, par rapport aux parallèles OP et TN coupées par la sécante OT.

509. Expérience fondée sur la réflexion totale. — Mettons de l'eau dans un vase de verre (*fig.* 343) et faisons flotter sur cette eau un disque de liège circulaire TT′, d'environ 3 centimètres de rayon, au-dessous duquel nous aurons adapté une épingle A, perpendiculaire à sa surface, et ayant une longueur d'environ 2 centimètres. En raison de ces dimensions, tout rayon lumineux émis par un point quelconque de l'épingle, et venant rencontrer la surface de l'eau en dehors du disque, fait avec la normale au point d'incidence un angle *plus grand que l'angle limite*, et éprouve, par suite, la *réflexion totale*. — On constate en effet que, quel que soit le point où l'on place l'œil au-dessus de la surface de l'eau, il est impossible d'apercevoir l'épingle. Au contraire, en plaçant l'œil en B, au-dessous de cette surface, on aperçoit une image de l'épingle, par réflexion. Cette image est seulement un peu allongée, en raison de la déviation qu'éprouvent les rayons lumineux en sortant de l'eau, en K, comme le montre la figure.

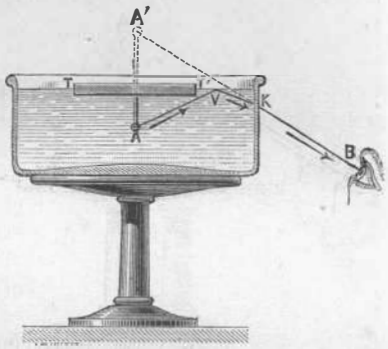


Fig. 343. — Expérience de la réflexion totale.

510. Prismes à réflexion totale. — C'est par ces mêmes principes que s'explique l'emploi des prismes dits *à reflexion totale*.

Les indices des diverses espèces de verre ayant toujours une valeur voisine de 1,5, l'angle limite est toujours voisin de 41°. Dès lors, soit un prisme triangulaire de verre, à base rectangle et isocèle ABC (*fig.* 344) ; soit S un point lumineux, situé à une distance telle que tous les rayons émis par ce point sur l'une des faces AB de l'angle droit s'écartent peu de la direction normale à cette face. Le rayon normal SI pénètre sans déviation par la face AB; il éprouve la réflexion totale sur la face hypoténuse AC, qu'il rencontre sous un angle de 45°; enfin, il sort normalement à la face BC, suivant IR. Quant aux rayons voisins S*m*, S*n*, qui sont émis par le même point S, ils tombent toujours sur la face hypoténuse sous un angle voisin de 45°; ils se comportent donc de la même manière. — Si les dimensions AB et BC du prisme sont négligeables par rapport à la distance du prisme au point lumineux, le prisme se comporte donc comme un miroir plan : il donne

une image virtuelle S′, symétrique de S par rapport au plan de la face AB.

Dans certains instruments d'optique, lorsqu'un faisceau formé de rayons à peu près parallèles doit être réfléchi dans une direction perpendiculaire à sa direction primitive, il est avantageux d'employer un prisme à réflexion totale, plutôt qu'un miroir métallique dont la surface éprouve, avec le temps, une altération assez rapide.

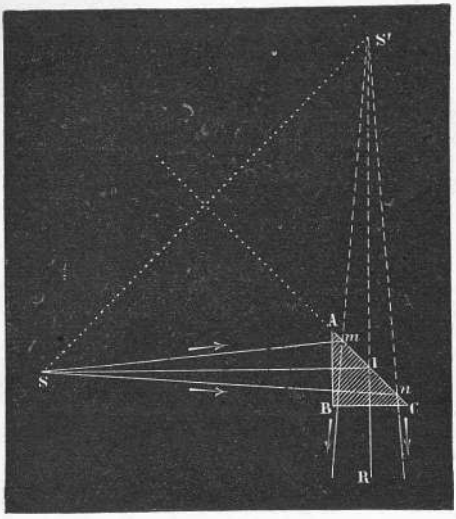


Fig. 344. — Prisme à réflexion totale.

511. Déplacement apparent des objets vus dans l'eau. — Lorsque l'œil est placé au-dessus de la surface d'une eau tranquille, dans une position qui lui permette de recevoir des rayons lumineux émis par des points placés dans l'eau, il voit en général ces points, non pas dans leur position réelle, mais dans une position plus voisine de la surface libre du liquide.

Mettons, par exemple, une pièce de monnaie *m* sur le fond d'un vase à parois opaques V (*fig.* 345) ; le vase étant d'abord vide, plaçons notre

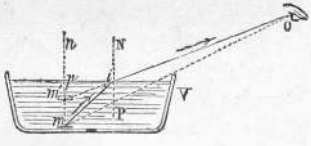


Fig. 345. — Déplacement apparent des objets vus dans l'eau.

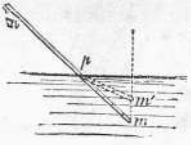


Fig. 346. — Apparence brisée d'un bâton pénétrant dans l'eau.

œil en un point O, tel qu'il aperçoive la pièce à moitié cachée par le bord du vase. Lorsqu'on viendra à verser de l'eau dans le vase, la pièce de monnaie deviendra visible tout entière : elle paraîtra relevée, ainsi que le fond du vase qui la supporte. — Dans cette expérience, en effet, les rayons qui parviennent à l'œil ne lui arrivent plus en ligne droite, suivant *m*O. L'œil reçoit des rayons, tels que *mi*, qui ont éprouvé

en i une réfraction les écartant de la normale : il voit alors la pièce en un point m' du prolongement de Oi, c'est-à-dire qu'il la voit relevée vers la surface de l'eau (*).

De même un bâton mn (*fig.* 346), en partie plongé dans l'eau, paraît brisé au point p, où il pénètre dans le liquide : la partie plongée pm apparaît en pm', c'est-à-dire relevée vers la surface.

512. Influence des réfractions produites par l'atmosphère, dans l'observation des astres. — Un rayon, tel que EA, émis par un astre, éprouve, en traversant les couches d'air atmosphérique, dont les densités sont progressivement croissantes, des réfractions en a, b, c,... qui ont pour effet de le rapprocher des normales Oa, Ob, Oc.... (*fig.* 347). Un observateur placé en A voit l'astre dans la direction AE', en sorte que l'astre paraît plus voisin du zénith qu'il ne l'est en réalité. — Ainsi, le Soleil ou les astres nous apparaissent *au-dessus de l'horizon*, dès qu'ils sont situés à une petite distance *au-dessous du plan tangent* mené à la surface de la Terre.

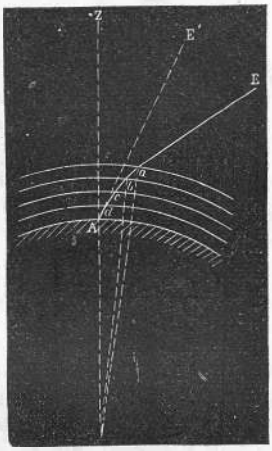


Fig. 347.
Réfractions atmosphériques.

On a construit des *tables de réfraction* qui donnent les corrections à effectuer, dans les observations astronomiques, pour chacune des valeurs de la *hauteur apparente* de l'astre au-dessus de l'horizon (**).

II. — RÉFRACTION AU TRAVERS DES PRISMES.

513. Définitions. — On désigne, en Optique, sous le nom de *prisme*, un milieu transparent, limité par deux faces planes faisant entre elles

(*) Si les rayons émergents qui parviennent à l'œil ne sont pas trop inclinés sur la surface du liquide, ce point m' est celui où le prolongement de Oi rencontre le rayon lumineux mp qui tombe normalement à la surface, rayon qui sort *sans déviation*.

(**) Ces tables ne s'appliquent pas aux cas où l'on observe des astres très voisins de l'horizon. Les rayons traversant alors des couches d'air dont les densités sont influencées, de manière très diverses, par le voisinage du sol, on ne peut exprimer la déviation par une loi. Il arrive même que la trajectoire du rayon lumineux ne reste pas dans un même plan vertical. — Le phénomène connu sous le nom de *mirage latéral* n'est qu'un cas particulier de ce genre d'effets, quand on observe des objets terrestres *voisins de l'horizon*. — Enfin le phénomène célèbre du *mirage*, observé dans les plaines sablonneuses de l'Égypte, est encore un phénomène qui se rattache à ces réfractions anormales, mais dont l'interprétation exacte, donnée par Bravais, repose sur les théories de l'Optique supérieure.

un certain angle. — On appelle *angle réfringent* l'angle dièdre formé par ces deux faces. — On comprend sous le nom de *base du prisme*, la région opposée à l'arête de cet angle. — Dans les prismes de verre qui servent aux expériences d'optique, comme le prisme P (*fig.* 348), la base est limitée par un plan parallèle à l'arête réfringente. La masse de verre présente alors la forme du solide que l'on désigne, en Géométrie, sous le nom de prisme triangulaire.

Fig. 348. — Prisme.

On appelle *section principale* d'un prisme, toute section faite perpendiculairement à l'arête réfringente : c'est ce qu'on désigne, en Géométrie, sous le nom de *section droite*. — Dans ce qui va suivre, nous supposerons que les rayons incidents sont *dans le plan d'une section principale*.

514. Action d'un prisme sur un faisceau de lumière parallèle. — Lorsqu'on introduit un faisceau de rayons solaires par une petite ouverture pratiquée dans le volet d'une chambre obscure, et qu'on le reçoit sur un prisme placé de manière que l'axe du faisceau lumineux soit dans le plan d'une section principale, on observe que les rayons émergents sont *déviés* vers la base du prisme. — En outre, si l'on reçoit le faisceau émergent sur un écran, on obtient une image *allongée*, et *colorée* des couleurs de l'arc-en-ciel.

De ces divers effets, nous allons étudier d'abord exclusivement le premier, la *déviation* : les autres seront étudiés plus loin.

515. Déviation produite par un prisme. — Soit A (*fig.* 349) une *section principale* d'un prisme. Soit SI un rayon incident : ce rayon pénètre dans le prisme en restant dans le plan de la figure, et en se rapprochant de la normale, suivant II'. En arrivant en I', le rayon éprouve, en général, une nouvelle réfraction (*) ; il s'écarte de la normale, et sort du prismeen restant dans le plan de la figure, dans une direction telle que I'S'. Ces deux réfractions, en I et I', ont donc, l'une et l'autre,

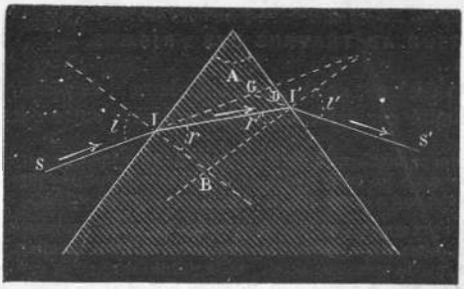


Fig. 349. — Déviation produite par un prisme.

(*) Lorsqu'un rayon lumineux, arrivé à la seconde face du prisme, fait avec la nor-

pour effet de dévier le rayon *vers la base du prisme*. — On appelle *angle de déviation*, l'angle D que forme le rayon émergent I'S' avec le prolongement du rayon incident SI.

516. Équations du prisme. — L'angle de déviation D est, dans le triangle GII', l'angle extérieur au sommet G ; il est donc égal à la somme des deux angles GII' et GI'I (*fig.* 349). Si nous désignons par i l'angle d'incidence, et par r l'angle de réfraction au point I ; par r', l'angle que fait le rayon II' avec la normale au point I', et par i' l'angle d'émergence, on voit que l'on a $GII' = i - r$, et $GI'I = i' - r'$; et par suite :

$$D = i + i' - (r + r'). \tag{1}$$

Dans le triangle IBI', l'angle B est le supplément de la somme $r + r'$; cet angle est aussi le supplément de l'angle A, puisque ses deux côtés sont respectivement perpendiculaires aux deux côtés de l'angle A ; on a donc

$$r + r' = A. \tag{2}$$

Enfin, d'après les lois de la réfraction, on a

$$\sin i = n \sin r, \tag{3}$$

$$\sin i' = n \sin r'. \tag{4}$$

Ces quatre équations sont les *équations du prisme*.

Le prisme étant donné par son indice de réfraction n et par son angle A, et la direction du rayon incident SI étant déterminée par l'angle i, l'équation (3) fera connaître la valeur de r ; en portant cette valeur dans l'équation (2), on déterminera l'angle r' ; l'équation (4) fera ensuite connaître i' ; enfin, en portant dans l'équation (1) les valeurs de r, r' et i', ainsi calculées successivement, on aura la valeur de la déviation D.

Remarque. — Si l'angle du prisme est *très petit*, et si l'angle d'incidence i n'est que d'un petit nombre de degrés, les angles r, r' et i' seront du même ordre de grandeur : on pourra alors remplacer les équations (3) et (4) par les équations $i = nr$, $i' = nr'$; en portant ensuite ces valeurs de i et de i' dans l'équation (1), on aura, en tenant compte de l'équation (2) :

$$D = (n - 1) A ;$$

relation dont nous ferons usage quand nous étudierons les propriétés des *lentilles* (555).

male à cette face un angle supérieur à l'angle limite (508), il éprouve la réflexion totale et se trouve rejeté vers l'intérieur du prisme, sans pouvoir émerger. — Soit RI (*fig.* 350) un rayon incident, qui se réfracte suivant II' ; pour que ce rayon puisse émerger en I', il suffit qu'il fasse, avec la normale I'n en ce point, un angle inférieur à l'angle limite. Abaissons du point I une droite ID perpendiculaire sur AC, et décrivons autour de cette droite un cône EIE' dont l'angle générateur EID soit égal à l'angle limite : si le rayon II' qui traverse le prisme est compris dans ce cône, l'angle II'n étant plus petit que EID, ce rayon peut émerger. — S'il était extérieur au cône EIE', il éprouverait la réflexion totale.

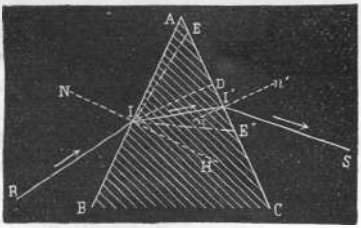


Fig. 350.

517. Déplacement apparent des objets vus au travers des prismes. — Lorsqu'on regarde un objet au travers d'un prisme, cet objet paraît déplacé *vers l'arête* du prisme : ce résultat s'explique immédiatement, d'après ce qui précède. — En effet, si le rayon PI, parti du point lumineux P (*fig.* 351), est réfracté de manière à suivre la route PII'O, l'œil placé en O voit ce point en P', dans le prolongement de OI'. — Les images ainsi observées sont d'ailleurs généralement confuses, et elles offrent des contours irisés, comme nous l'expliquerons plus loin.

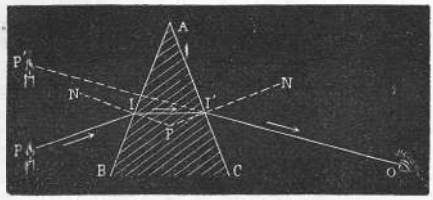


Fig. 351. — Déplacement apparent d'un objet vu au travers d'un prisme.

518 Influence de la nature du prisme et de la valeur de son angle réfringent, sur la grandeur de la déviation. — D'après la marche même de la lumière dans un prisme (515), il est évident que la grandeur de la déviation doit dépendre, d'une part, de la nature du prisme ; d'autre part, de la valeur de son angle réfringent. — C'est ce que nous allons vérifier par l'expérience.

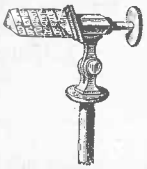


Fig. 352. Polyprisme.

1° Pour constater l'influence de la *nature* du prisme, on prend un *polyprisme* (*fig.* 352), formé de petits prismes égaux, de *différents verres*, ayant leurs arêtes en prolongement. Si, par une fente horizontale pratiquée dans le volet d'une chambre obscure, on fait arriver un faisceau de rayons solaires qui rencontre à la fois tous ces prismes, on obtient une série de petits faisceaux émergents, présentant autant de directions différentes que le polyprisme comprend de substances diverses.

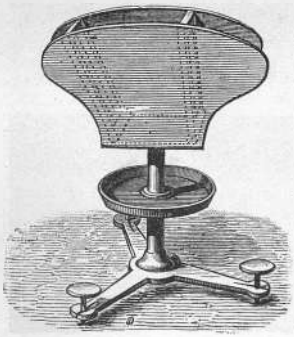


Fig. 353. — Prisme à angle variable.

2° Pour constater l'influence de la valeur de l'*angle réfringent*, on fait usage du *prisme à angle variable* (*fig.* 353) : c'est une auge formée par deux plaques métalliques fixes, entre lesquelles peuvent se mouvoir, autour de deux charnières, deux cadres formés par des glaces de verre. Si l'on verse de l'eau dans cette auge, la masse liquide représente un prisme, dont l'arête réfringente serait déterminée par l'intersection des plans des deux glaces prolongées. — Or, si l'on fait tomber un

faisceau lumineux sur ce prisme, et si, laissant immobile la face d'entrée, on incline de plus en plus la face de sortie, on observe une déviation d'autant plus grande qu'on a donné au prisme liquide un angle plus grand (*).

519. Minimum de déviation. — Lorsqu'un rayon tombe, sous une incidence déterminée i, sur un prisme dont on connaît l'angle A (*fig.* 349) et l'indice de réfraction n, la loi de Descartes permet de déterminer les directions successives II', I'S', que prend ce rayon : on arrive ainsi à une expression de la *déviation* produite par le prisme, c'est-à-dire de l'angle que forme le rayon émergent avec la direction primitive du rayon incident. — Si l'on considère i comme une variable, prenant successivement toutes les valeurs depuis 0° jusqu'à 90°, le calcul montre que la déviation passe par un *minimum* : ce minimum correspond au cas où l'incidence est telle, *que l'angle d'émergence* i' *soit égal à l'angle d'incidence* i.

On peut vérifier ce résultat par l'expérience. — Si par une petite ouverture, pratiquée dans le volet d'une chambre obscure, on fait arriver un pinceau de lumière sur un prisme P (*fig.* 348), on voit, sur les deux faces du prisme, deux petites taches lumineuses qui correspondent aux deux points d'incidence et d'émergence, et qui sont produites par une diffusion partielle de la lumière sur les surfaces du verre. En faisant tourner le prisme P, au moyen du bouton *b*, autour d'un axe parallèle à son arête, de manière que l'angle d'incidence augmente d'une manière continue, et en recevant le faisceau émergent sur un écran, on constate que la déviation diminue d'abord, mais seulement jusqu'à un *minimum*, à partir duquel elle reprend des valeurs croissantes.— Lorsque le prisme est dans la position correspondante au minimum de déviation, on constate que les deux taches lumineuses sont *à égale distance de l'arête* du prisme. On en conclut que le rayon intérieur II' (*fig.* 354) est alors perpendiculaire au plan bissecteur du dièdre A, que les angles r e r' sont égaux, et que par conséquent les angles i et i' *sont égaux.*

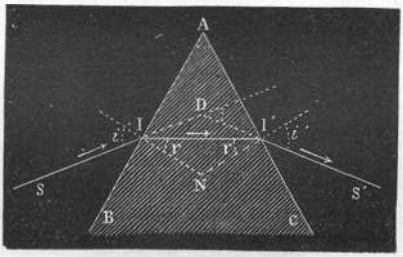


Fig. 354. — Minimum de déviation.

520. Détermination des indices de réfraction. — Nous pouvons maintenant, en considérant ce dernier résultat comme fourni par

(*) En changeant progressivement l'inclinaison des faces, il est facile de réaliser également, avec cet appareil, les conditions nécessaires pour qu'il y ait *réflexion totale* sur la seconde face du prisme. (Voir la note de la page 410.)

l'expérience, obtenir une relation simple, entre la valeur de la *déviation minimum* D, l'angle du prisme A, et son indice de réfraction n. — Supposons le prisme placé dans la position du minimum de déviation. Dans le triangle NII'' (*fig.* 554), la somme des angles r et r' est le supplément de l'angle N; d'autre part, dans le quadrilatère AINI', les angles en I et en I' étant droits, l'angle N est le supplément de A : donc $r + r' = A$, et comme $r = r'$, on a

$$r = \frac{A}{2}.$$

— Si nous considérons maintenant le triangle DII', l'angle extérieur D est égal à la somme des deux angles intérieurs DII' et DI'I : chacun de ces deux angles a pour valeur $i - r$; donc $D = 2i - 2r$. En remplaçant $2r$ par A, il vient $D = 2i - A$, ou enfin

$$i = \frac{D + A}{2}.$$

En remplaçant r et i par ces valeurs dans la relation $\frac{\sin i}{\sin r} = n$, on obtient la relation cherchée

$$\frac{\sin \frac{D + A}{2}}{\sin \frac{A}{2}} = n.$$

Cette relation est celle dont on fait usage pour la détermination expérimentale des indices de réfraction des diverses substances. — Lorsqu'il s'agit d'un corps solide, on taille deux faces planes formant un angle réfringent, sur lequel on reçoit un faisceau de lumière parallèle : on cherche, par tâtonnements, quelle est la position pour laquelle on obtient la *déviation minimum*. Connaissant l'angle A des deux faces, il suffit de mesurer la déviation D, au moyen d'appareils spécialement construits pour cet usage; la relation précédente permet alors de calculer n. — Lorsqu'il s'agit d'un corps liquide, on le place dans un prisme creux, limité par des lames de verre à faces parallèles, qui n'ont pas d'influence sur la déviation.

Le tableau suivant donne les indices de quelques corps solides ou liquides, dont on a le plus souvent à faire usage :

	INDICES DE RÉFRACTION (*).
Eau	1,336
Éther	1,358
Alcool	1,363
Crown-glass (verre sans plomb)	1,529
Sel gemme	1,550
Flint-glass, ou cristal (verre plombeux)	1,655
Sulfure de carbone	1,678
Diamant	2,420

(*) Les indices de réfraction varient, comme on le verra plus loin, avec la couleur de la lumière employée. Les nombres ci-dessus se rapportent à la lumière *jaune*.

III. — LENTILLES SPHÉRIQUES.

521. Définitions. — On nomme *lentilles sphériques*, des masses transparentes, généralement en verre, et limitées par deux surfaces sphériques ou par une surface sphérique et une surface plane. Nous les distinguerons en deux groupes :

1° Les lentilles *à bords minces*, dont l'épaisseur est croissante depuis les bords jusqu'au milieu. Ces lentilles sont aussi désignées sous le nom de lentilles *convergentes*, qui indique, comme on le verra plus loin, leur propriété essentielle. — Elles comprennent trois variétés : la lentille *biconvexe* A (*fig.* 355), la lentille *plan-convexe* A′, et le *ménisque convergent* A″.

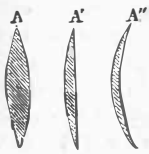


Fig. 355.
Lentilles convergentes.

2° Les lentilles *à bords épais*, dont l'épaisseur diminue depuis les bords jusqu'au milieu : on les désigne sous le nom de lentilles *divergentes*. — Ces lentilles comprennent encore trois variétés : la lentille *biconcave* B (*fig.* 356), la lentille *plan-concave* B′, et le *ménisque divergent* B″.

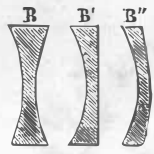


Fig. 356.
Lentilles divergentes

On appelle *axe principal* d'une lentille, la droite qui passe par les centres des deux faces sphériques. Si l'une des deux faces est plane, l'*axe principal* est la perpendiculaire menée du centre de la face sphérique sur la face plane.

522. Lentilles convergentes. — Foyer principal. — Lorsqu'on prend une lentille *à bords minces*, par exemple une lentille biconvexe, et qu'on l'oriente de façon que son axe principal soit dirigé vers le centre du Soleil, l'expérience montre que les rayons lumineux sont réfractés de manière à passer tous à l'intérieur d'un très petit cercle perpendiculaire à l'axe principal, et dont le centre F est situé sur l'axe principal (*fig.* 357). — En particulier, tous les rayons qui viennent du centre du Soleil, et qui tombent sur la lentille dans des directions parallèles à son axe principal, passent par le point F. — Ce point est le *foyer principal* de la lentille.

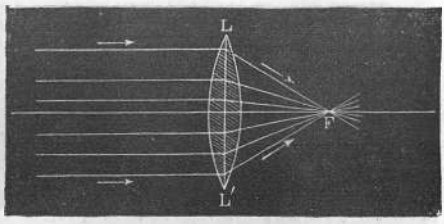


Fig. 357.
Foyer principal d'une lentille convergente.

Il est facile de se rendre compte de cette action exercée par la len-

tille sur les rayons qui la rencontrent parallèlement à son axe principal. Soit RI l'un de ces rayons (*fig.* 358); il éprouve, en pénétrant dans le verre, une première réfraction, suivant II′, qui le rapproche de la normale menée au point d'incidence, c'est-à-dire du rayon de courbure OI. En sortant de la lentille, il éprouve une seconde réfraction et s'écarte de la normale en I′, c'est-à-dire du rayon de courbure O′I′N′. Ces deux réfractions successives ont pour effet, l'une et l'autre, de *ramener le rayon lumineux vers l'axe principal*, et comme le rayon incident était parallèle à l'axe, le rayon émergent I′F viendra nécessairement rencontrer cet axe en un certain point F, situé *au delà de la lentille* (*). — On démontrera plus loin (526) qu'un autre rayon incident quelconque, parallèle à l'axe principal, vient, après réfraction, passer *par le même point* F.

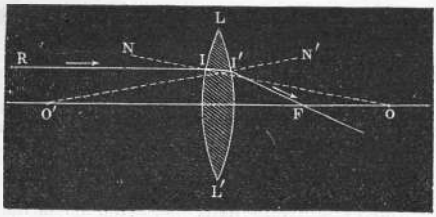


Fig. 358. — Convergence des rayons, produite par une lentille à bords minces.

C'est cette propriété, commune aux trois variétés de lentille A, A′ et A″ (*fig.* 355), qui leur fait donner le nom de lentilles *convergentes*. — La distance du point F à la lentille est ce qu'on appelle la *distance focale principale*.

Dans la figure 357, pour simplifier le tracé, on a supposé que chaque rayon, au lieu d'éprouver deux déviations successives, l'une à l'entrée et l'autre à la sortie, n'en éprouve qu'une, au point où il rencontre le plan LL′ mené par les bords de la lentille. C'est ce que nous ferons dans toutes les constructions du même genre.

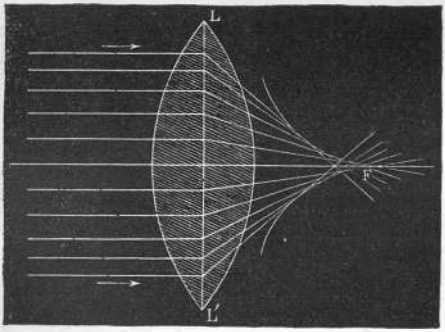


Fig. 359. — Aberration de sphéricité.

523. Aberration de sphéricité des lentilles. — Caustiques par réfraction. — Lorsque les ouvertures des faces d'une lentille ne sont pas négligeables, il se produit un phénomène analogue à celui que nous avons signalé dans les miroirs sphériques (487), pour des rayons inci-

(*) C'est, du reste, ce dont on peut encore se rendre compte, en observant que la

dents parallèles à l'axe principal : les rayons réfractés viennent rencontrer l'axe en des points d'autant plus voisins de la lentille, que l'incidence a lieu plus près du bord. Les intersections successives de ces rayons déterminent alors, dans le plan de la figure, une courbe lumineuse (*fig.* 359), qu'on nomme *caustique par réfraction* ; elles déterminent dans l'espace, une surface lumineuse, dite *surface caustique*, qu'on peut regarder comme engendrée par la révolution de la courbe autour de l'axe principal.

Pour diminuer ces effets de l'*aberration de sphéricité*, dans les instruments d'optique, on masque les bords des lentilles au moyen de diaphragmes annulaires qui arrêtent les rayons trop voisins des bords.

524. Foyers des divers points d'un objet. — Plaçons maintenant, sur l'axe principal d'une lentille convergente, et à une distance plus

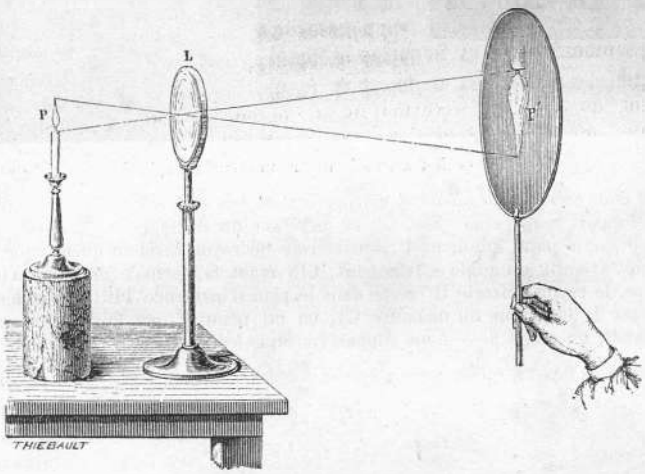


Fig. 360. — Image produite par une lentille convergente.

grande que sa distance focale principale, une source lumineuse de petites dimensions, comme la flamme d'une bougie P (*fig.* 360) ; puis, cherchons, comme nous l'avons fait dans les expériences sur les miroirs sphériques, quelle position il faut donner à un écran, au delà de la lentille, pour obtenir la plus grande concentration possible de lumière. — Nous trouverons que la région éclairée sur l'écran P′ présente la forme d'une image de la bougie.

On peut donc considérer comme un résultat d'expérience que, à *chaque point* de l'objet lumineux, correspond un *foyer* par lequel

lentille agit sur le rayon RI comme le ferait un prisme de verre dont les faces se confondraient avec les plans tangents menés en I et en I′ ; la base de ce prisme se trouvant toujours, par suite de la forme même de la lentille, du côté de l'axe principal, le rayon est toujours dévié vers cette région (515).

viennent passer tous les rayons lumineux émanés de ce point. — La théorie montre d'ailleurs qu'il en doit être ainsi.

525. Réfraction d'un faisceau émané d'un point lumineux, par une surface sphérique. — Pour nous rendre compte de l'action exercée par une lentille convergente sur les rayons émanés d'un même point, considérons d'abord une surface sphérique MM′ (*fig.* 561), de très petite ouverture, sépa

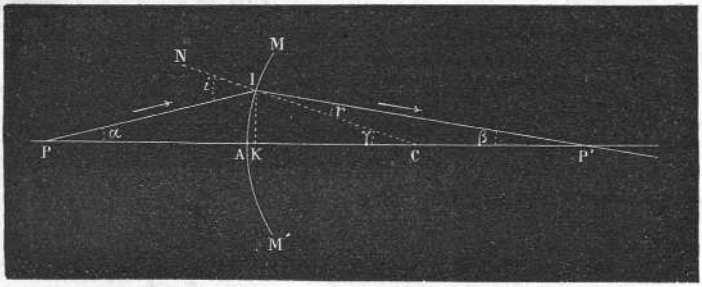


Fig. 561. — Réfraction à travers une surface sphérique.

rant deux milieux inégalement réfringents, et soit n l'indice du second milieu par rapport au premier. Soit CA la direction du diamètre de la sphère qui passe par le point lumineux P ; considérons un rayon incident quelconque PI, faisant avec CP un angle α très petit ; CIN étant la normale au point d'incidence, le rayon réfracté IP′ reste dans le plan d'incidence PIC ; il vient rencontrer la direction du diamètre CA, en un point P′, en faisant avec cette direction un angle β. — Nous supposerons que les angles i et r sont toujours assez petits pour qu'on puisse confondre les rapports $\frac{i}{r}$ et $\frac{\sin i}{\sin r}$: la loi de Descartes peut alors s'écrire $i = nr$. Or, en désignant par γ l'angle ACI, on a

$$i = \alpha + \gamma, \qquad r = \gamma - \beta,$$

d'où l'on tire

$$\alpha + \gamma = n(\gamma - \beta), \qquad \text{ou} \qquad \alpha + n\beta = (n-1)\gamma.$$

Abaissons du point I la perpendiculaire IK sur le diamètre CA ; si l'ouverture de la surface est suffisamment petite, on peut considérer les angles α, β, γ, comme mesurés par $\frac{IK}{AP}$, $\frac{IK}{AP'}$, $\frac{IK}{AC}$; et la relation précédente devient, en supprimant le facteur commun IK,

$$\frac{1}{AP} + \frac{n}{AP'} = \frac{n-1}{AC}.$$

La position du point P′ est donc indépendante du point d'incidence I, c'est-à-dire que tous les rayons issus du point P, viennent après réfraction à travers la surface MN, se couper *en un même point* P′ situé sur le diamètre CP. — Le point P′ est le foyer *réel* du point P.

Il peut arriver que le rayon réfracté IP′ soit dirigé de telle manière que ce soit *son prolongement* qui vienne rencontrer la direction du diamètre CA, en un point P′, situé *du même côté de* A *que le point* P. En faisant la figure dans ce cas, et répétant le même raisonnement, on verra que tous les rayons

issus de P donneront encore après réfraction, des rayons dont les prolongements iront passer par *ce même point* P'. — Le point P' sera alors le foyer *virtuel* du point P.

Enfin, on démontrerait de même que tous les rayons qui tomberaient sur la surface MM', en convergeant vers un point Q, iraient après réfraction, se couper réellement ou virtuellement en un même point Q', situé sur le diamètre CQ.

526. Réfraction d'un faisceau émané d'un point lumineux, par une lentille sphérique. — Soit maintenant une lentille, limitée par deux portions de surfaces sphériques dont les centres sont C et C'; et soit un point lumineux P. Les rayons issus de ce point vont, après réfraction à travers la première face de la lentille, se couper en un même point P_1, virtuel ou réel, situé sur le diamètre CP. On peut alors considérer les rayons qui traversent la deuxième face de la lentille comme issus d'un même point P_1, ou comme allant concourir en un même point P_1; dans tous les cas, après avoir subi la réfraction sur la deuxième face, ces rayons, ou leurs prolongements, iront passer par un même point P', situé sur le diamètre CP_1. — Donc, en définitive, les rayons lumineux issus d'un point P, après avoir traversé la lentille, se coupent en *un même point* P', qui est le foyer réel ou virtuel du point P.

Lorsque le point lumineux P est situé sur l'axe principal CC', les points P_1 et P' sont tous les deux situés sur cet axe. Si le point P s'éloigne, sur l'axe principal, jusqu'à l'infini, c'est-à-dire si les rayons incidents constituent un faisceau lumineux parallèle à l'axe principal (*fig.* 357), le point P', situé sur l'axe principal, vient au point F, qui est le foyer conjugué du point lumineux à l'infini. C'est le *foyer principal* de la lentille.

527. Centre optique. Axes secondaires. — Dans un rayon lumineux qui traverse une lentille, on doit considérer, en général, trois directions successives différentes : la direction du rayon *incident*, celle du rayon *intérieur* à la lentille, et celle du rayon *émergent*. — Nous

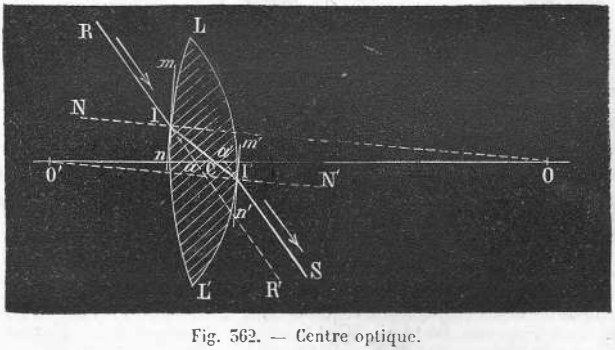


Fig. 362. — Centre optique.

allons démontrer qu'il existe un point jouissant de cette propriété, que, si un rayon incident donne un rayon *intérieur* qui passe par ce point, le rayon émergent est parallèle au rayon incident. — Ce point prendra le nom de *centre optique* de la lentille.

Soient O et O′ (*fig.* 362) les centres des faces d'une lentille, R et R′ leurs rayons de courbure : nous allons démontrer d'abord que, si l'on mène à cette lentille deux plans tangents parallèles entre eux, la droite qui joint les deux points de contact rencontre l'axe principal *en un point constant*, quels que soient les deux plans considérés. — Soient *mn* et *m′n′* les traces de deux plans parallèles, tangents à la lentille en I et I′ : menons la droite II′ et soit C le point où elle rencontre l'axe OO′. Les normales OI et O′I′ étant parallèles, les triangles semblables ICO et I′CO′ donnent $\frac{CO}{CO'} = \frac{OI}{O'I'}$, ou $\frac{CO}{CO'} = \frac{R}{R'}$. — Donc la position du point C est indépendante de celle du point I, c'est-à-dire de la direction des deux plans tangents considérés. Il est aisé de voir que, réciproquement, si, par le point C déterminé par la relation précédente, on mène une droite quelconque, et des plans tangents aux points I et I′ où elle rencontre les deux faces, ces plans tangents seront toujours parallèles.

Or, ce point C jouit précisément de la propriété qui a été énoncée plus haut, comme caractérisant le *centre optique*. — En effet, soit un rayon lumineux RI, rencontrant la lentille sous une incidence telle que le rayon *intérieur* passe par le point C ; les plans tangents menés au point d'incidence I et au point d'émergence I′ étant parallèles entre eux, tout se passe comme si ce rayon traversait une lame de verre à faces parallèles (506) ; par suite, le rayon émergent I′S est *parallèle au rayon incident* RI ; c'est ce qu'on nomme un rayon *sans déviation*.

Si maintenant l'épaisseur de la lentille est négligeable, on pourra regarder le rayon émergent comme *se confondant* avec la direction IR′ du rayon incident, et cette direction comme passant elle-même par le point C. — On est conduit ainsi à cet énoncé, dont nous ferons usage dans tout ce qui va suivre : *Dans toute lentille d'épaisseur négligeable, pour tout rayon incident dont la direction passe par le centre optique, le rayon émergent est dans le prolongement du rayon incident* (*).

Soit A (*fig.* 363) un point lumineux situé hors de l'axe principal d'une lentille C, et à une distance AP de cet axe, très petite par rapport à sa distance AC à la lentille ; la droite AC, qui joint le point A au centre optique, prend le nom d'*axe secondaire* du point A. Un rayon lumineux dirigé suivant AC doit être considéré comme continuant sa route en

(*) Les points *a* et *a′*, où les prolongements du rayon incident RI, et du rayon émergent I′S, rencontrent l'axe principal, sont deux points *fixes* ; on voit, en effet, qu'ils représentent les foyers conjugués du centre optique C, par rapport à l'une ou à l'autre des surfaces réfringentes. On leur a donné le nom de *points nodaux*. — Dans une lentille de verre, la distance des points nodaux *aa′* est sensiblement le tiers de l'épaisseur de la lentille.

Quelque grande que soit l'épaisseur de la lentille, *à tout rayon incident* RI *dont la direction passe par le point nodal a, correspond un rayon émergent* I′S, *qui lui est parallèle, et dont la direction passe par l'autre point nodal a′*. — Quand on considère l'épaisseur de la lentille comme négligeable, on suppose les deux points nodaux confondus avec le centre optique.

ligne droite, suivant CA′ ; mais d'autre part, on sait que tous les rayons émanés du point A, et traversant la lentille, vont passer *par un même point* (524, 526) : ce point se trouve donc sur la droite ACA′. — En d'autres termes, *le foyer conjugué d'un point situé hors de l'axe principal se trouve sur l'axe secondaire de ce point.*

528. Construction géométrique du foyer d'un point situé hors de l'axe principal. — Cela posé, pour construire géométriquement la position du foyer conjugué de A, il suffira de tracer *un seul* rayon réfracté, et de déterminer son intersection avec l'axe secondaire. — Menons, par exemple, un rayon AI parallèle à l'axe principal (*fig.* 365) ;

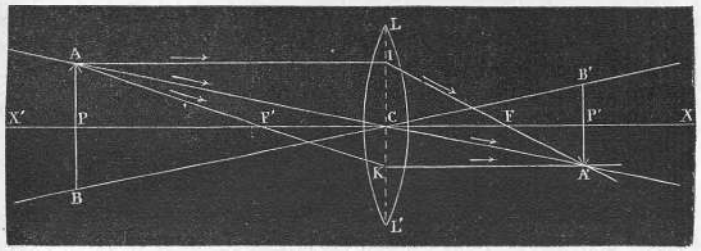


Fig. 365. — Construction géométrique du foyer d'un point lumineux.

ce rayon se réfracte suivant une direction IF qui passe par le foyer principal F ; l'intersection de la droite IF avec l'axe secondaire détermine le point A′, foyer conjugué de A.

Il est quelquefois plus commode d'employer, au lieu du rayon précédent, un autre rayon. — Soit F′ le foyer principal pour les rayons parallèles à l'axe qui tomberaient sur la face de droite ; si l'on mène du point A un rayon incident AF′K qui passe par ce point, ce rayon sortira de la lentille suivant une direction KA′ parallèle à l'axe principal ; l'intersection de KA′ avec l'axe secondaire détermine encore le point A′, foyer conjugué de A (*).

529. Droites conjuguées. — Plans conjugués. — Relation numérique entre les distances conjuguées. — Des points A et A′ (*fig.* 365) abaissons sur l'axe principal les perpendiculaires AP et A′P′ ; et considérons, d'une part, les triangles semblables ICF, IKA′ ; d'autre part, les triangles semblables KCF′, KIA ; on a :

$$\frac{IC}{IK} = \frac{CF}{KA'}, \qquad \frac{KC}{KI} = \frac{CF'}{IA},$$

(*) Ces constructions donnent le foyer conjugué du point A, lors même que le rayon lumineux dont on fait usage ne rencontrerait pas la lentille : ce sont des constructions purement géométriques, et, si l'un des rayons AI ou AK ne rencontre pas la lentille, il en faut conclure simplement que ce rayon *ne concourt pas à la production de l'image.*

d'où, en remarquant que IC + KC = KI, et que CF = CF',

$$\frac{CF}{KA'} + \frac{CF}{IA} = 1 \qquad \text{ou} \qquad \frac{1}{KA'} + \frac{1}{IA} = \frac{1}{CF}.$$

Si le point lumineux A se déplace sur la droite AP, la distance IA demeurant constante, la distance KA' reste donc invariable, c'est-à-dire que le point conjugué se déplace sur la droite A'P'. Ces deux droites, jouissant de cette propriété que tout point lumineux pris sur l'une a son foyer conjugué sur l'autre, sont appelées *droites conjuguées*.

Faisons maintenant tourner le plan de la figure autour de l'axe principal : chacune des droites conjuguées décrit un plan perpendiculaire à l'axe principal, et il est évident que tout point lumineux pris sur l'un de ces plans a son foyer conjugué sur l'autre : ces deux plans sont appelés *plans conjugués*. — Si l'on désigne par p et p' les distances de ces plans au centre optique de la lentille, par f la distance CF, on a, entre p, p' et f, la relation

$$\frac{1}{p} + \frac{1}{p'} = \frac{1}{f} \text{ (*)}.$$

530. Construction géométrique de l'image d'une droite perpendiculaire à l'axe principal. — Soit LL' la section d'une lentille convergente, dont C est le centre optique, et dont les deux foyers sont F et F'. Marquons aussi sur l'axe les deux points H et H' (*fig.* 364) dont les distances au centre optique sont égales *au double de la distance focale principale* CF. — D'après la propriété des droites conjuguées, l'image d'une droite perpendiculaire à l'axe principal sera une autre droite perpendiculaire à cet axe; il suffira donc, pour construire l'image, de déterminer le foyer d'un point A de la droite donnée (528), de mener par ce foyer une perpendiculaire à l'axe principal, et de limiter la grandeur de l'image en menant les axes secondaires qui passent par les extrémités de la droite donnée (527).

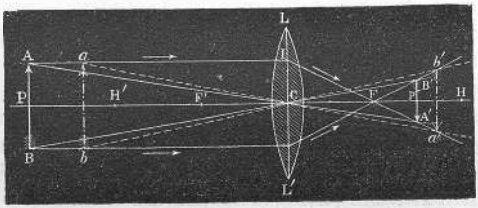


Fig. 364. — Image réelle, plus petite que l'objet

1° Considérons d'abord un objet AB (*fig.* 364) placé à une distance de la lentille *plus grande que le double de la distance focale principale*. — La construction géométrique montre que l'image A'B' est *réelle* et

(*) Cette formule est applicable quelle que soit l'épaisseur de la lentille, à la condition de compter chacune des distances p et p', à partir des points nodaux a et a' (*fig.* 362). La distance focale f est exactement la distance de chacun des foyers principaux au point nodal correspondant.

renversée par rapport à l'objet. — Dans le cas actuel, l'image est *plus petite que l'objet*; en effet, dans les triangles semblables A'AI et A'CF, AI étant, par hypothèse, plus grand que 2CF, CA est plus grand que CA'; dès lors, les triangles semblables ACB et A'CB' montrent que AB est plus grand que A'B'. — Enfin, des considérations analogues montrent que CI' est plus grand que CF et plus petit que CH, c'est-à-dire que *la distance de l'image à la lentille est supérieure à la distance focale principale, mais inférieure au double de cette distance* (*).

A mesure que l'objet se rapproche de la lentille, l'image s'en éloigne et grandit. Dans la figure 364, *ab* représente le même objet, placé plus près de la lentille : il forme alors son image en *a'b'*.

2° Si l'objet est à une distance de la lentille *égale au double de la distance focale principale*, la même construction montre que *l'image est réelle, renversée et égale en grandeur à l'objet*; l'image et l'objet sont alors *également distants de la lentille.*

3° Si l'objet est à une distance de la lentille *plus petite que le double de la distance focale principale*, mais *plus grande que la distance focale principale*, l'image, toujours réelle et renversée par rapport à l'objet, se forme au delà du point H, et elle devient *plus grande que l'objet.* C'est ce qui résulte de la réciprocité des positions des foyers conjugués; c'est dans ces conditions qu'est faite l'expérience représentée par la figure 360.

4° Si l'objet arrive *à la distance focale* CF' (*fig.* 365), il ne se forme plus d'image. En effet, l'axe secondaire AC et le rayon réfracté IF, dont la rencontre doit déterminer le foyer conjugué du point A, sont parallèles, puisque les côtés AI et CF du quadrilatère AICF sont égaux et parallèles. Tous les rayons émanés du point A sortent de la lentille parallèlement à l'axe secondaire de ce point.

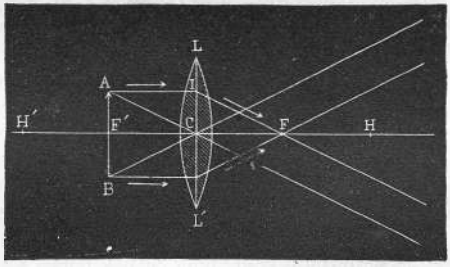


Fig. 365.

5° Supposons enfin l'objet AB placé *entre le foyer principal* F' *et la lentille* (*fig.* 366). — La figure AICF est alors un trapèze, dans lequel AI est plus petit que CF : donc les prolongements du rayon réfracté IF et de l'axe secondaire AC se rencontrent en A', du même côté que l'objet, et au delà de A. Les rayons émanés de A forment donc, au

(*) On voit que l'image et l'objet sont compris entre les mêmes droites AA' et BB' qui se croisent au centre optique : c'est-à-dire que l'image et l'objet *sont vus* du centre optique *sous le même angle.*

sortir de la lentille, un faisceau *divergent* : si ce faisceau vient rencontrer l'œil, il paraît émané du *foyer virtuel* A′. — On trouvera de même l'image virtuelle B′ du point B, et l'on obtiendra définitivement une image A′B′, qui sera *droite*, *virtuelle* et *plus grande que l'objet*. — Une pareille image ne peut venir se peindre sur un écran; elle ne peut être perçue que par un observateur dont l'œil sera placé de manière à recevoir les faisceaux divergents. La lentille fonctionne alors comme une *loupe* : nous reviendrons plus loin sur ce sujet (566).

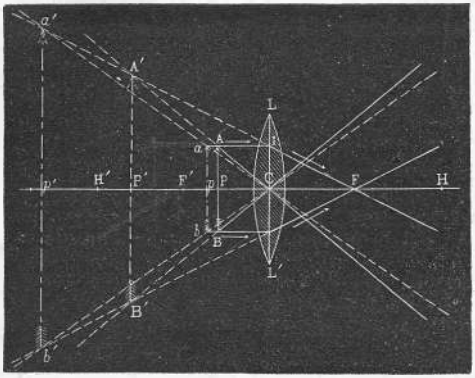


Fig. 366. — Image virtuelle.

A mesure que l'objet s'éloigne de la lentille, sans arriver au foyer principal F′, l'image s'en éloigne également et grandit. Dans la figure 366, *ab* représente le même objet, placé plus loin de la lentille que AB; il forme alors son image en *a′b′*.

531. Détermination analytique de la position, de la nature, du sens et de la grandeur de l'image. — Quand un objet lumineux est situé dans un plan P perpendiculaire à l'axe principal d'une lentille, l'image est dans le plan conjugué P′ du plan de l'objet (529); la position de l'image est donc déterminée par l'équation

$$(1) \qquad \frac{1}{p}+\frac{1}{p'}=\frac{1}{f}.$$

Si cette équation donne pour p' une valeur positive, l'image est *réelle*; elle est *virtuelle* dans le cas contraire.

Considérons le cône qui a pour sommet le centre optique de la lentille, et pour base le contour de l'objet; le contour de l'image, devant se trouver à la fois sur le cône et dans le plan P′, est à l'intersection de ce cône et du plan conjugué du plan de l'objet. — Supposons que p soit toujours positif. Si la valeur trouvée pour p' est positive, les deux plans P et P′ sont situés de part et d'autre de la lentille; l'un rencontre une des deux nappes du cône; l'autre, la nappe opposée : l'image est *renversée*. — Si la valeur trouvée pour p' est négative, les deux plans sont d'un même côté de la lentille; ils coupent la même nappe du cône : l'image est *droite*. — En général, l'image est *renversée* ou *droite*, selon que le rapport $\frac{p'}{p}$ est *positif* ou *négatif*.

Enfin le rapport de deux dimensions linéaires homologues i et o de l'image et de l'objet est égal à la valeur absolue du rapport $\frac{p'}{p}$; on a donc, comme pour les miroirs concaves,

$$\frac{i}{o} = \sqrt{\frac{p'^2}{p^2}}. \qquad (2)$$

L'image est *agrandie* ou *diminuée*, selon que $\frac{p'^2}{p^2}$ est supérieur ou inférieur à l'unité.

L'équation (1) permettant de calculer p', $\frac{p'}{p}$, et $\frac{p'^2}{p^2}$, on connaîtra, d'après les signes et les grandeurs de ces quantités, la *position*, la *nature* (réelle ou virtuelle), le *sens* et la *grandeur* de l'image.

Les résultats sont compris dans le tableau suivant :

$p = \infty$	$p' = f$	image	réelle,	renversée,	infiniment diminuée.
$\infty > p > 2f$	$f < p' < 2f$	—	réelle,	renversée,	diminuée.
$p = 2f$	$p' = 2f$	—	réelle,	renversée,	égale.
$2f > p > f$	$2f < p' < \infty$	—	réelle,	renversée,	agrandie.
$p = f$	$p' = \pm\infty$	—	réelle, virtuelle,	renversée, droite.	infiniment agrandie.
$f > p > 0$	$p' < 0$	—	virtuelle,	droite,	agrandie.

532. Vérifications expérimentales. — Ces résultats peuvent être vérifiés par des expériences semblables à celles que nous avons faites pour les miroirs sphériques concaves (496).

Une bougie P étant placée de manière que le milieu de la flamme soit à peu près sur l'axe principal d'une lentille convergente L (*fig.* 360), on constate que, si la distance de la bougie à la lentille est d'abord très grande, il vient se peindre sur un écran placé au delà de la lentille, à une distance très peu supérieure à la distance focale principale f, une image réelle, renversée, et extrêmement diminuée. — Si l'on rapproche un peu la bougie de la lentille, on doit, pour que l'image conserve sa netteté, éloigner l'écran au delà du foyer principal : l'image augmente, tout en restant plus petite que l'objet. — Quand la distance de la bougie à la lentille devient égale à $2f$, l'écran doit être placé au delà de la lentille, à la même distance $2f$, et la grandeur de l'image devient égale à celle de l'objet. — Quand la distance de la flamme à la lentille devient inférieure à $2f$, tout en restant supérieure à f (c'est le cas de la figure 360), la distance de l'écran à la lentille doit être plus grande que $2f$, et l'image, toujours renversée, est agrandie.

Il est d'ailleurs intéressant de constater que, dans tous les cas qui précèdent, on peut supprimer l'écran, et percevoir la formation de l'image *aérienne*, en plaçant l'œil dans le cône de rayons lumineux divergents, au delà de l'image elle-même (497).

Enfin, si l'on rapproche la bougie de la lentille à une distance plus petite que f, il ne se forme plus d'image au delà de la lentille : l'œil

placé derrière la lentille voit, du même côté que l'objet, une image virtuelle, droite et agrandie.

533. Expression de la valeur de f, en fonction de R, R′ et n. — Soit LL′ une section de la lentille par un plan qui contient l'axe principal (*fig.* 567); le rayon incident PI se réfracte suivant II′P′, en demeurant dans

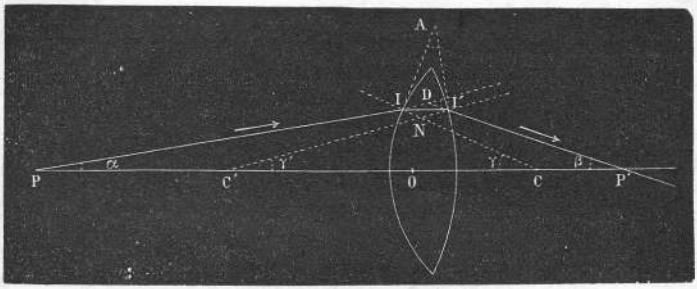


Fig. 567.

le plan de la figure. Par rapport à ce rayon lumineux, la lentille LL′ se comporte comme le ferait un prisme dont la section principale serait IAI′; soit D la déviation, c'est-à-dire l'angle aigu formé par les prolongements du rayon incident PI et du rayon émergent I′P′; soit A l'angle que font entre elles les tangentes menées aux points I et I′ : on sait (516, *Rem.*) que l'on a

$$D = (n - 1)A.$$

Mais, en désignant par α, β, γ et γ' les angles IPO, IP′O, ICO, I′C′O, il est facile de voir que l'angle de déviation D est égal à la somme $\alpha + \beta$; d'autre part, l'angle A et l'angle obtus N, ayant leurs côtés respectivement perpendiculaires, sont supplémentaires : et comme, dans le triangle CNC′, l'angle N est supplémentaire de la somme $\gamma + \gamma'$, il en résulte que l'angle A est égal à la somme $\gamma + \gamma'$; la relation précédente devient donc

$$\alpha + \beta = (n - 1)(\gamma + \gamma'). \qquad (1)$$

Puisque nous supposons la lentille très mince, nous devons considérer les points I et I′ comme se confondant en un seul, situé sur la perpendiculaire à l'axe principal, menée par le centre optique O : soit y la distance de ce point à l'axe. Les angles α, β, γ et γ' ont alors sensiblement pour mesures $\frac{y}{OP}$, $\frac{y}{OP'}$, $\frac{y}{OC}$ et $\frac{y}{OC'}$; et la relation (1) devient, en supprimant le facteur commun y,

$$\frac{1}{OP} + \frac{1}{OP'} = (n - 1)\left(\frac{1}{OC} + \frac{1}{OC'}\right). \qquad (2)$$

Si l'on désigne par p et p' les distances de la lentille au point lumineux et à son foyer, par R et R′ les deux rayons de courbure de la lentille, que nous supposons ici biconvexe, on obtient ainsi, entre les quantités p et p', la relation numérique

$$\frac{1}{p} + \frac{1}{p'} = (n - 1)\left(\frac{1}{R} + \frac{1}{R'}\right). \qquad (3)$$

En particulier, si le point lumineux P s'éloigne jusqu'à l'infini, en sorte que $\frac{1}{p}$ tende vers zéro, les rayons incidents constituent un faisceau parallèle à

l'axe principal, et vont, après réfraction, se couper au foyer principal de la lentille (*fig.* 557) ; la distance p' tend vers la distance focale f. Il vient alors :

$$(4) \qquad \frac{1}{f} = (n-1)\left(\frac{1}{R} + \frac{1}{R'}\right),$$

relation qui permet de calculer la distance focale d'une lentille, en fonction des rayons de courbure, et de l'indice du verre de la lentille (*).

534. Lentilles divergentes. — Foyer principal virtuel. — Prenons une lentille *à bords épais*, telle que B, B′ ou B″ (*fig.* 556), et orientons-la de façon que son axe principal passe par le centre du soleil : l'expérience montre qu'il sort de la lentille un faisceau *divergent*. — L'œil d'un observateur, placé dans ce faisceau, voit un petit cercle lumineux, situé *du côté où la lentille reçoit la lumière*. Le centre de ce petit cercle est le *foyer principal virtuel* de la lentille.

Voici comment on peut se rendre compte de ce résultat. — Soit un rayon RI, tombant par exemple sur une lentille biconcave LL′ (*fig.* 568) dans une direction parallèle à son axe principal OO′. Ce rayon éprouve, en pénétrant dans le verre, une première réfraction, qui le rapproche de la normale OIN, suivant II′ ; en sortant de la lentille, il éprouve une seconde réfraction, qui l'éloigne de la normale O′I′, et prend la direction I′T. Ces deux réfractions ont pour effet, l'une et l'autre, *d'écarter le rayon lumineux de l'axe principal*. Dès lors, le prolongement géométrique I′F du rayon émergent vient rencontrer l'axe principal en un certain point F, situé *du même côté de la lentille que le rayon incident* (**). — Le point F est *le même pour tous les rayons incidents* RI, SK, etc., parallèles à l'axe principal (526).

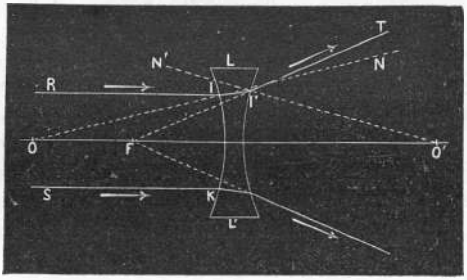


Fig. 568.— Divergence des rayons, produite par une lentille à bords épais.

(*) Dans le calcul de $\frac{1}{f}$, au moyen de la formule (4), on devra affecter du signe — le rayon de courbure correspondant à une face concave. Si l'une des faces est plane, son rayon de courbure étant l'infini, l'inverse est nul. — Quand la lentille est biconvexe ou plan-convexe, la quantité f est nécessairement positive. — Si la lentille a une face convexe et l'autre concave, la quantité f, calculée comme il vient d'être dit, est positive si le rayon de courbure de la face convexe est plus petit que le rayon de courbure de la face concave ; c'est le cas du ménisque convergent (*fig.* 555, A″).

(**) La lentille agit sur le rayon RI (*fig.* 568) comme le ferait un prisme de verre dont les faces se confondraient avec les plans tangents menés en I et I′, et dont la base serait du côté opposé à l'axe principal.

CHAPITRE IV

DISPERSION

I. — DÉCOMPOSITION ET RECOMPOSITION DE LA LUMIÈRE.

537. Décomposition de la lumière blanche. — Spectre solaire. — Lorsqu'on fait tomber un faisceau de rayons solaires sur un prisme, il éprouve, outre la déviation que nous avons étudiée (515) un *épanouissement* et une *coloration*. — En effet, si l'on reçoit le faisceau émergent sur un écran MN (*fig.* 370), on observe que la région éclairée est allongée dans le sens perpendiculaire à l'arête du prisme, et présente des teintes variables d'une extrémité à l'autre (*). Ces teintes se fondent les unes dans les autres, en sorte qu'il est difficile de distinguer où finit l'une d'elles et où commence l'autre : on peut cependant les rapporter à sept couleurs principales, qui sont :

Violet, indigo, bleu, vert, jaune, orangé, rouge.

C'est le violet qui est *le plus dévié* vers la base du prisme ; c'est le rouge qui l'est le moins. — Cet épanouissement qu'éprouve le faisceau lumineux a reçu le nom de *dispersion*. — L'image colorée est ce qu'on nomme le *spectre solaire*.

Pour expliquer la formation du spectre solaire, Newton a admis que la *lumière blanche*, telle qu'elle nous arrive du Soleil, est formée de diverses couleurs, *inégalement réfrangibles* par un même milieu transparent, comme le verre. — Cette hypothèse suffit pour expliquer le phénomène : car, si les diverses couleurs sont réunies dans le faisceau incident RI (*fig.* 370), et si elles sont inégalement réfrangibles, elles ne

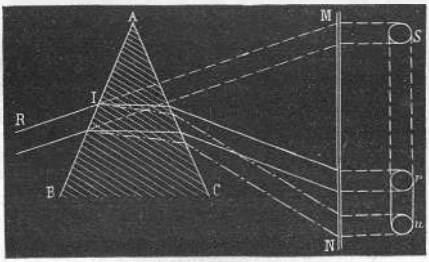


Fig. 370. — Production du spectre.

(*) Dans la figure 370, on a représenté l'écran rabattu, à droite, autour de la ligne

peuvent plus rester réunies en traversant le prisme ; il se produit, à la sortie du prisme, autant de faisceaux de directions différentes qu'il y a de couleurs. — Ces faisceaux, rencontrant l'écran en des points différents, ne peuvent plus produire de la lumière blanche.

Pour justifier cette explication, Newton s'est proposé de démontrer par l'expérience : 1° que les diverses couleurs du spectre sont *simples* et *inégalement réfrangibles* ; 2° qu'on peut effectuer artificiellement une *recomposition de la lumière blanche*, en superposant ces diverses couleurs.

538. Les diverses couleurs du spectre sont simples et inégalement réfrangibles. — En pratiquant une petite ouverture *m* dans l'écran MN, qui reçoit le spectre *ru* formé par un prisme A (*fig.* 571),

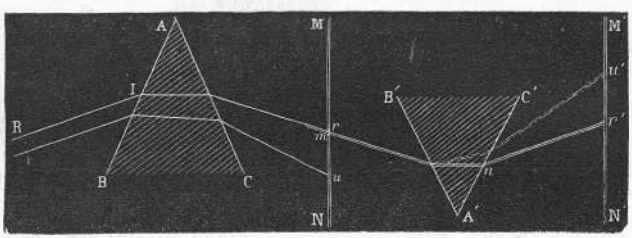


Fig. 571. — Inégale réfrangibilité des diverses couleurs.

on peut isoler un faisceau appartenant à une certaine nuance de rouge, par exemple. Si l'on reçoit ce faisceau rouge *r* sur un second prisme A', on constate d'abord qu'on n'obtient en *r'*, sur un second écran M'N', *aucune autre couleur* que la couleur rouge primitive. — En général, les expériences de ce genre montrent que chaque nuance du spectre est *simple*, c'est-à-dire qu'elle n'est plus décomposable en couleurs différentes.

En outre, si l'on fait tourner le prisme A de manière à faire passer par l'ouverture *m* des rayons violets, par exemple, on constate qu'ils éprouvent en traversant le prisme A' une déviation plus grande que les rayons rouges ; en sorte que l'image vient se former en *u'* sur le second écran. — Cette expérience prouve donc bien que les diverses couleurs présentent, à travers une même substance, *des réfrangibilités qui vont en croissant* depuis le rouge jusqu'au violet.

L'expérience suivante, connue sous le nom d'*expérience des prismes croisés*, conduit à la même conclusion. — Soient deux prismes égaux, placés près l'un de l'autre, l'un P (*fig.* 572) ayant ses arêtes verticales, l'autre P' ayant ses arêtes horizontales. Introduisons dans une chambre

MN ; en S, est l'image *blanche* que produisait le faisceau de rayons solaires, avant qu'on eût placé le prisme ; en *ru*, la succession des images *colorées* produites par le prisme, depuis le rouge *r*, jusqu'au violet *u*.

obscure un faisceau horizontal de lumière blanche, qui donne, sans interposition d'aucun prisme, une image blanche S (*fig.* 373) sur un

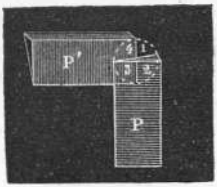


Fig. 372.

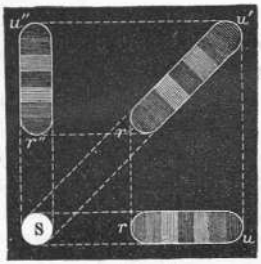


Fig. 373.

Expérience des prismes croisés.

écran. — Si l'on place sur le trajet du faisceau le prisme vertical P, cette image se transforme en un spectre horizontal *ru*; si maintenant, derrière le prisme P, on dispose le prisme horizontal P', on voit apparaître en *r'u'* un spectre incliné à 45 degrés par rapport à *ru*. — Ce résultat s'explique immédiatement, si l'on admet que les diverses couleurs sont inégalement réfrangibles : le faisceau violet tombant sur P' doit éprouver une déviation verticale plus grande que celle du faisceau rouge, en sorte que le spectre doit être incliné ; de plus, les angles réfringents des deux prismes étant égaux, les déviations *Sr* et *rr'* doivent être égales entre elles : l'inclinaison du spectre doit donc être de 45 degrés (*).

539. Recomposition de la lumière blanche. — Pour montrer que la coloration du spectre n'est pas due à une altération que le prisme aurait fait subir à la lumière, Newton a vérifié, par diverses expériences, qu'en superposant de nouveau les rayons séparés par le prisme, on reconstitue de la lumière blanche.

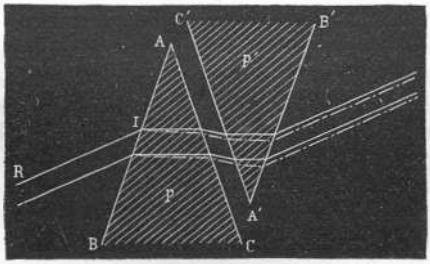


Fig. 374. — Recomposition de la lumière par un second prisme.

1° *Recomposition par un second prisme.* — Soit RI (*fig.* 374) un faisceau de lumière blanche, traversant un premier prisme P : au lieu de recevoir le faisceau réfracté sur un écran, où il formerait un spectre, fai-

(*) On peut disposer l'expérience de manière à obtenir à la fois quatre images sur l'écran : il suffit de placer les prismes, comme le représente la figure 372, de telle

sons-le tomber sur un second prisme identique P′, dont les faces soient parallèles à celles de P, mais dirigées en sens contraire. En recevant les rayons sur un écran, à leur sortie du prisme P′, on obtient une image *blanche*. — On voit en effet que, à la sortie du second prisme, le faisceau de lumière rouge (représenté en traits pleins) est redevenu parallèle au faisceau de lumière violette (représenté en traits discontinus) : ces faisceaux se confondent alors dans la plus grande partie de leur largeur, et il en est de même des faisceaux formés par les couleurs intermédiaires ; c'est la superposition de tous ces faisceaux, de diverses couleurs, qui produit l'image blanche. — Cette image présente seulement quelques irisations sur son bord supérieur et sur son bord inférieur, où les faisceaux extrêmes débordent un peu les faisceaux voisins.

2° *Recomposition par une lentille convergente, ou par un miroir concave.* — Recevons les rayons réfractés par le prisme BAC (*fig.* 375) sur une

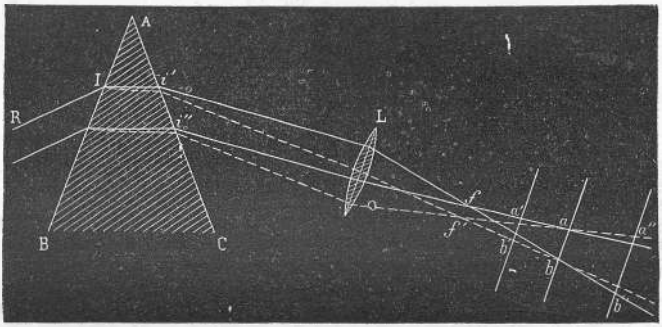


Fig. 375. — Recomposition de la lumière par une lentille convergente.

entille convergente L. Le faisceau rouge émergent (représenté en lignes pleines) ira, après avoir été réfracté par la lentille, converger en un point *f* de l'axe secondaire parallèle à sa direction primitive (527) : de même, le faisceau violet émergent (représenté en lignes discontinues) ra converger, après avoir traversé la lentille, en un point *f′* de l'axe secondaire parallèle à sa direction primitive ; au delà de ces points, les rayons de l'une et de l'autre couleur formeront deux faisceaux divergents, qui se traverseront en *ab*. Or, la partie commune aux deux faisceaux appartient évidemment aussi aux faisceaux formés par les rayons de réfrangibilités intermédiaires : si donc la superposition de tous les rayons du spectre reproduit la lumière blanche, on devra obte-

sorte que leurs arêtes réfringentes soient tangentes au faisceau incident ; ce faisceau est alors partagé en quatre parties 1, 2, 3, 4, dont la première donne l'image directe S (*fig.* 373) ; la seconde donne le spectre horizontal *ru* ; la troisième, le spectre incliné *r′u′* ; la quatrième, un spectre vertical *r″u″*, produit par le seul prisme P′.

nir une image *blanche*, sur un écran placé en *ab*. C'est ce que l'expérience vérifie (*). — La construction montre que, si l'on place l'écran en avant de *ab*, en *a'b'* par exemple, on doit avoir une image blanche, bordée de rouge en haut et de violet en bas ; au contraire, au delà de *ab*, en *a"b"* par exemple, on doit avoir une image blanche, bordée de violet en haut et de rouge en bas ; c'est ce que l'expérience vérifie.

En employant un miroir concave au lieu d'une lentille convergente, on opère la recomposition des couleurs d'une manière semblable.

540. Expérience du disque de Newton. — Pour montrer que la sensation simultanée de toutes les couleurs du spectre produit sur notre œil l'impression de la lumière blanche, on peut encore faire usage du *disque de Newton*.

Pour comprendre le principe sur lequel est fondée cette expérience, prenons un disque de carton noir C (*fig.* 376) sur lequel on aura collé

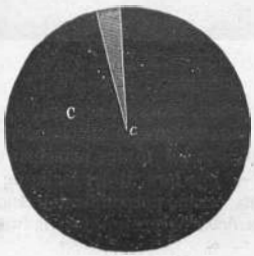


Fig. 376.

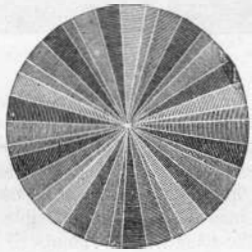


Fig. 377.

Disque de Newton.

une bande de papier rouge *c*, en forme de secteur circulaire. Faisons tourner rapidement le disque autour d'un axe qui passe par son centre. Pendant la rotation, *toute la surface* du disque nous paraîtra colorée en rouge. — Cela tient à ce que la sensation produite sur notre œil par la bande rouge, dans chacune de ses positions, dure un certain temps, en sorte que, pendant la rotation, nous la voyons *à la fois* dans ses positions successives.

Or, le *disque de Newton* (*fig.* 377) est un disque semblable, sur lequel on a collé des secteurs de papier présentant successivement toutes les couleurs du spectre. Si on le fait tourner rapidement, sa surface doit présenter *toutes ces colorations* à la fois, *en chacun de ses points*. — On constate, en effet, que la surface du disque paraît *blanche*.

541. Aberrations de réfrangibilité des lentilles. — Achromatisme. — Un rayon de lumière blanche, en traversant une lentille, se trouve dans

(*) Pour que les points *f* et *f'*, où vont converger les rayons violets et les rayons rouges, soient à la même distance de la lentille L, il est indispensable de faire usage d'une lentille achromatique (541, *fig.* 379).

les mêmes conditions que s'il traversait un prisme dont les faces seraient tangentes à la lentille aux points d'incidence et d'émergence. Ce rayon est donc à la fois dévié et décomposé. — Considérons, par exemple, un faisceau de lumière blanche tombant sur une lentille convergente LL′ *de faible ouverture* (*fig.* 378), parallèlement à l'axe principal X′X. Les rayons rouges, qui

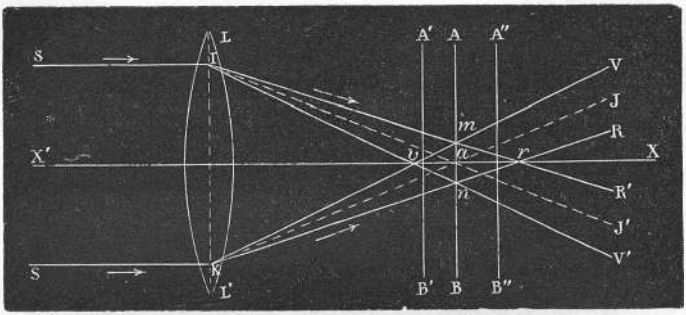


Fig. 378. — Aberrations de réfrangibilité des lentilles.

sont les moins réfrangibles, iront, après réfraction, couper l'axe principal en un point r; les rayons violets, qui sont les plus réfrangibles, couperont ce même axe en un point v, plus voisin de la lentille; les foyers principaux des autres couleurs seront situés entre r et v. — Dès lors, il est facile de voir que, quel que soit le point où l'on place un écran, perpendiculairement à l'axe principal, il est impossible que la région éclairée présente de la lumière blanche dans tous ses points (*).

Ces considérations sont applicables aux faisceaux émanés de points situés à des distances finies de la lentille : de là résulte que, même avec une lentille de *très petite ouverture*, il est impossible d'obtenir des images ne présentant pas des irisations, au moins sur leurs bords. — Ces effets ont reçu le nom d'*aberrations de réfrangibilité*.

Pour diminuer ces aberrations, qui nuisent à la netteté des images, on réunit ensemble deux ou plusieurs lentilles, formées de verre différents, et constituant ce qu'on appelle des systèmes *achromatiques*. — Si l'on assemble *deux lentilles*, l'une convergente et l'autre divergente (*fig.* 379), la première en crown et la seconde en flint, et si l'on donne à ces lentilles des courbures

(*) Supposons que l'écran occupe la position AB (*fig.* 378), qui passe par l'intersection mn de la première nappe rK du cône des rayons rouges avec la seconde nappe VvV′ du cône des rayons violets. Tous les points éclairés recevront à la fois des rayons rouges et des rayons violets. Mais il y aura une couleur, le jaune, par exemple, dont le foyer sera en a : les génératrices extrêmes du cône des rayons jaunes seront KaJ et laJ′ : aucun des points de la surface mn, autre que a, ne recevra de jaune. Si maintenant on remarque que les foyers des couleurs intermédiaires entre le rouge et le jaune correspondent aux points situés entre r et a; que les foyers des couleurs intermédiaires entre le jaune et le violet correspondent aux points situés entre a et v, on voit que la surface mn ira en s'irisant successivement, du centre vers les bords. — Il est facile de voir que, pour toute position A′B′ située en deçà de AB, les bords de l'image contiendront toujours uniquement de la lumière rouge. Pour toute position A″B″ située au delà de AB, les bords de l'image contiendront uniquement de la lumière violette.

convenablement calculées, la théorie montre que l'on peut obtenir un système qui fonctionne comme une lentille *convergente*, mais dans lequel *deux couleurs* émanées d'un même point, le rouge et le violet par exemple, forment toujours leurs foyers exactement en un même point. — Cependant, avec deux lentilles, les images présentent encore de légères irisations, parce que les couleurs intermédiaires entre le rouge et le violet ont encore des foyers un peu différents. Avec *trois lentilles*, on peut achromatiser rigoureusement *trois couleurs*, le rouge, le jaune et le violet, par exemple ; les autres couleurs ont alors leurs foyers sensiblement aux mêmes points, et l'on fait disparaître à peu près complètement toute irisation (*).

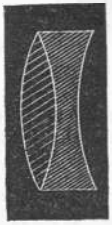


Fig. 379. Lentille achromatique.

542. Couleurs complémentaires. — Couleurs des corps éclairés par la lumière blanche. — On dit que deux couleurs sont *complémentaires*, lorsque ces couleurs superposées produisent du blanc.

Si l'on fait tomber un spectre solaire sur un écran percé d'ouvertures qui laissent passer seulement certaines couleurs, et si, à l'aide d'une lentille, on fait converger ces couleurs en un point, on obtient une teinte complémentaire de celle qu'on obtiendrait en superposant les autres couleurs. — Par exemple, en arrêtant le rouge et superposant les autres couleurs, on obtient une sorte de vert bleuâtre, qui est une couleur composée, *complémentaire du rouge*.

Les couleurs que nous présentent les divers corps, quand ils sont éclairés par la lumière blanche, résultent de la manière inégale dont ils agissent sur les diverses couleurs qui constituent cette lumière. — Ainsi, quand une étoffe, éclairée par la lumière du jour, nous apparaît avec la couleur *rouge*, c'est que les rayons rouges sont les seuls qu'elle *diffuse* dans toutes les directions : elle absorbe les autres couleurs, dont le mélange formerait la teinte complémentaire du rouge.

Les corps *blancs*, comme le papier, sont des corps qui diffusent en égale proportion les rayons de *toutes les couleurs*. — Les corps *noirs* sont ceux qui absorbent toutes les couleurs, sans en diffuser aucune. Quand un corps est absolument noir, on ne peut le distinguer que par contraste avec les corps voisins.

Des remarques semblables sont applicables aux *corps transparents*. — Un *verre rouge* est un verre qui, recevant de la lumière blanche, ne laisse passer que les rayons rouges, et absorbe les autres couleurs. — Le *verre à vitres ordinaire* laisse passer également toutes les couleurs, en sorte que la lumière transmise présente la même composition qu'avant son passage au travers du verre.

D'après cela, il est facile d'expliquer, par exemple, l'aspect que nous

(*) Newton avait regardé comme insoluble le problème de l'achromatisme, c'est-à-dire la construction d'un système réfringent, capable de *dévier* les faisceaux lumineux *sans les décomposer*. C'est à l'opticien anglais Dollond qu'on doit la solution de cette question : la découverte de l'achromatisme date de 1758.

présente un paysage, quand nous le regardons au travers d'un *verre rouge*. Les corps blancs qui s'y trouvent nous paraissent rouges, parce que, des diverses couleurs qu'ils émettent, le verre rouge ne laisse passer que la couleur rouge. Pour la même raison, les corps rouges nous apparaissent, dans ce cas, avec leur couleur réelle. Mais les corps bleus, verts ou jaunes, nous paraissent noirs, parce que le verre rouge ne laisse passer aucune de ces couleurs.

543. Propriétés calorifiques et propriétés chimiques du spectre. — Rayons infra-rouges et rayons ultra-violets. — Lorsqu'on décompose les rayons solaires au moyen d'un prisme de sel gemme, on constate, ainsi que nous l'indiquerons dans l'étude de la chaleur rayonnante, que ce spectre possède des propriétés calorifiques, croissantes du violet au rouge. Si l'on continue à explorer l'espace situé au delà du rouge, on constate que ce spectre calorifique se prolonge encore dans une étendue à peu près égale à celle du spectre lumineux. — Ces rayons *calorifiques obscurs*, dont la réfrangibilité est moindre que celle des rayons qui sont à la fois calorifiques et lumineux, ont reçu le nom de rayons *infra-rouges*.

Si maintenant on reçoit le spectre solaire sur quelques-unes de ces substances dans lesquelles la lumière peut effectuer des décompositions chimiques, et qui sont en usage dans la photographie, on constate que les actions chimiques sont très inégales dans les diverses régions du spectre. A l'inverse des propriétés calorifiques, les propriétés chimiques se manifestent surtout dans les régions qui correspondent aux rayons voisins du violet; en outre, ce spectre chimique dépasse, du côté du violet, les limites du spectre lumineux. — Le soleil nous envoie donc, outre les rayons qui sont à la fois chimiques et lumineux, des rayons *chimiques obscurs*, d'une réfrangibilité plus grande que les premiers : on leur donne le nom de rayons *ultra-violets* (*).

544. Propriétés phosphorogéniques. — C'est particulièrement aux rayons doués de propriétés chimiques que paraît appartenir la propriété de déterminer la *phosphorescence*.

Certaines substances, placées dans la partie la plus déviée du spectre visible, ou même dans les rayons ultra-violets, répandent une lueur phosphorescente, dont la teinte dépend de la nature même de ces substances. — Quelques-unes conservent quelque temps la propriété de luire ainsi, lorsqu'on les transporte dans l'obscurité : tels sont le spath-fluor, le sulfate de baryte calciné avec du soufre ou des matières organiques, les écailles d'huître calcinées, etc. : ce sont ces corps qu'on appelle spécialement *phosphorescents*. — D'autres substances cessent d'être lumineuses dès qu'on intercepte les rayons

(*) Pour étudier les propriétés chimiques des diverses radiations, il convient d'employer un prisme et une lentille formés de *cristal de roche* : le verre arrêterait une grande partie des rayons plus réfrangibles que les rayons violets extrêmes.

qu'elles recevaient : telles sont la solution de sulfate de quinine, l'infusion d'écorce de marronnier d'Inde, le verre coloré par l'oxyde d'uranium, etc. ; on les désigne sous le nom de substances *fluorescentes*.

Pour constater la propriété que possèdent les radiations ultra-violettes, de développer la phosphorescence ou la fluorescence, on fait, dans les cours, l'expérience suivante. Avec un pinceau imprégné d'une solution de sulfate de quinine dans l'acide tartrique, on trace une longue bande sur un carton blanc, et l'on fait tomber le spectre solaire sur ce carton, de manière qu'il couvre une partie de sa longueur ; on aperçoit alors, non seulement la portion du carton qui était visible avant l'addition du sulfate de quinine, mais encore une certaine longueur de la bande au delà du violet. Le sulfate de quinine n'étant que fluorescent, le phénomène disparaît dès qu'on intercepte la lumière incidente.

545. Les diverses couleurs se distinguent entre elles, comme les sons de diverses hauteurs, par la rapidité du mouvement vibratoire, ou par la longueur d'onde. — Des expériences délicates, dans le détail desquelles il nous serait impossible d'entrer, ont permis, non seulement de vérifier les diverses conséquences qui se déduisent de l'hypothèse des ondulations, mais encore de mesurer les *longueurs d'ondes lumineuses* dans l'air, pour chacune des couleurs simples qui constituent la lumière blanche : ces longueurs d'onde vont en décroissant du rouge au violet, c'est-à-dire qu'elles ont une valeur d'autant plus petite qu'elles se rapportent à une couleur plus réfrangible. — Or, on a vu (416) que, dans un mouvement vibratoire en général, si l'on désigne par v la vitesse de propagation du mouvement, par λ la longueur d'onde, et par n le nombre de vibrations par seconde, on a

$$v = n\lambda.$$

On connaît la vitesse de propagation de la lumière dans l'air, égale à environ 300 000 kilomètres par seconde (592) ; cette formule permet donc de calculer le nombre de vibrations n pour une couleur déterminée, étant donnée la longueur d'onde λ.

Pour le jaune, par exemple, la valeur de la longueur d'onde λ est d'environ 6 dix-millièmes de millimètre : on a donc

$$n = \frac{300000000^{m}}{0^{m},0000006} = \frac{300}{0,6} \times 10^{12} = 500 \times 10^{12};$$

c'est-à-dire que la lumière jaune correspond à environ 500 *trillions* de vibrations par seconde. — Pour les autres couleurs, on trouve que le nombre de vibrations par seconde varie entre 400 trillions et environ 700 trillions, en allant du rouge au violet.

On voit que les vibrations lumineuses sont beaucoup plus rapides que les vibrations sonores, puisque les vibrations des sons les plus aigus, perceptibles à l'oreille, ne dépassent guère une vingtaine de mille par seconde (423). — Mais le caractère qui distingue entre elles les lumières de diverses couleurs est le même que celui qui distingue les sons de diverses hauteurs : c'est la rapidité plus ou moins grande du mouvement vibratoire.

II. — ÉTUDE DES SPECTRES DE DIVERSES ORIGINES. ANALYSE SPECTRALE.

546. Méthode de Newton pour obtenir un spectre pur. — Lorsqu'on fait pénétrer un faisceau de lumière solaire dans une chambre obscure, par une petite ouverture, on obtient, sur un écran placé à une certaine distance de l'ouverture, sans interposition de prisme, une image blanche, sensiblement circulaire (465). Par suite, lorsqu'on place un prisme sur le trajet du faisceau, on obtient, sur l'écran, un spectre dans lequel les nuances sont plus ou moins mélangées, en raison de l'empiétement des couleurs voisines les unes sur les autres. — Pour obtenir un spectre *pur*, c'est-à-dire dans lequel la séparation des rayons de nuances différentes se fasse aussi complètement que possible, Newton a employé la méthode suivante.

On introduit la lumière, dans la chambre obscure, par une fente très étroite. Le faisceau est reçu sur une lentille convergente (*), placée à une distance de l'ouverture égale au double de sa distance focale principale. Cette lentille donne, sur un écran placé à la même distance, de l'autre côté, une image brillante de la fente lumineuse, et les dimensions de cette image sont égales à celles de la fente (550, 2°). Enfin, on place le prisme au voisinage de la lentille, de manière que son arête réfringente soit parallèle à la longueur de la fente; on l'oriente dans une position correspondant à peu près au minimum de déviation (519), et l'on dirige l'écran de façon qu'il soit perpendiculaire à la direction moyenne des rayons réfractés. — Le spectre résulte alors de la juxtaposition d'une infinité de rectangles très déliés, empiétant peu les uns sur les autres. Le mélange des couleurs est d'autant moindre que la largeur de la fente est plus petite.

547. Raies du spectre solaire. — Dans le spectre solaire, obtenu par la méthode de Newton, on observe un grand nombre de *raies obscures*, parallèles à l'arête du prisme. L'apparition de ces raies prouve que, dans la lumière du soleil, il n'y a pas continuité parfaite entre les réfrangibilités des radiations qui la constituent : on peut dire qu'il y manque un grand nombre de couleurs simples, dont le degré de réfrangibilité serait déterminé par la place qu'occupent les raies obscures.

La production de ces lignes obscures avait échappé à Newton, probablement à cause du peu d'homogénéité des lentilles dont il pouvait faire usage. Le phénomène a été signalé par Wollaston, en 1802. Treize ans après, un physicien de Munich, Fraunhofer, en fit une étude attentive, et parvint à compter environ six cents de ces lignes; c'est pourquoi on les désigne souvent sous le nom de *raies de Fraunhofer*. —

(*) La lentille doit être achromatique (541).

Plus tard, Brewster, M. Kirchhoff et d'autres expérimentateurs en ont encore signalé de nouvelles.

On distingue aisément huit groupes principaux de raies, qui ont été désignés par les lettres A, B, C, D, E, F, G, H, et dont la figure 380 représente la position (avec celle de quelques autres groupes, *a*, *b*); dans l'intervalle, on découvre encore une multitude de lignes plus fines, distribuées irrégulièrement dans le spectre (*).

548. Spectroscope. — Le spectre que l'on obtient sur un écran, en employant la méthode de Newton (546), est la succession d'une série d'images réelles de la fente, formées chacune par les rayons d'une nuance déterminée. Or, supposons qu'on supprime l'écran et qu'on

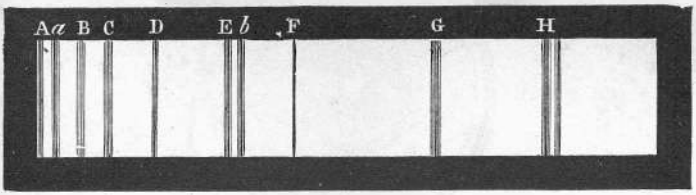


Fig. 380. — Raies du spectre solaire.

place, au delà de la position qu'il occupait et sur le trajet des faisceaux lumineux, une loupe; l'œil placé derrière cette loupe verra l'image *aérienne* du spectre, comme il verrait un objet occupant la même position : le grossissement produit par la loupe permettra, en outre, de mieux distinguer les détails. — Mais la succession de la lentille qui, dans la méthode de Newton, reçoit le faisceau lumineux à sa sortie du prisme, et de la lentille qui fonctionne comme loupe, constitue précisément le système que nous étudierons plus loin sous le nom de *lunette astronomique*. Ce mode d'observation revient donc, en réalité, à placer au delà du prisme P (*fig.* 381), sur la direction du faisceau réfracté, une lunette LO convenablement ajustée.

On place ordinairement la fente F, par laquelle arrivent les rayons, à l'extrémité d'un tube noirci intérieurement, et l'on fixe dans ce tube une lentille C, dont la fente F occupe le foyer principal : les rayons qui viennent de chacun des points de la fente sortent alors de la lentille *parallèlement* entre eux, et arrivent sur le prisme comme s'ils venaient d'un objet placé à l'infini. — Le système formé d'une lentille et d'une ente ainsi disposées porte le nom général de *collimateur*.

L'appareil dont nous venons d'indiquer les éléments essentiels a été

(*) Les raies du spectre forment des lignes de repère fixes, que l'on utilise pour la détermination précise des indices de réfraction. — Pour la construction des instruments d'optique, dans lesquels on veut obtenir un achromatisme aussi parfait que possible, il est utile de connaître, pour les différentes sortes de verre, les indices de réfraction qui correspondent aux rayons voisins des raies principales.

désigné sous le nom de *spectroscope*. — Le prisme P est placé au centre d'un limbe circulaire, et le collimateur FC en un point du contour de ce cercle, de façon que son axe aille rencontrer l'une des faces du prisme; la lunette OL est mobile dans le plan du limbe, de manière à permettre d'explorer le faisceau réfracté par le prisme. — Enfin, pour comparer entre elles les positions des diverses raies, on fixe sur le

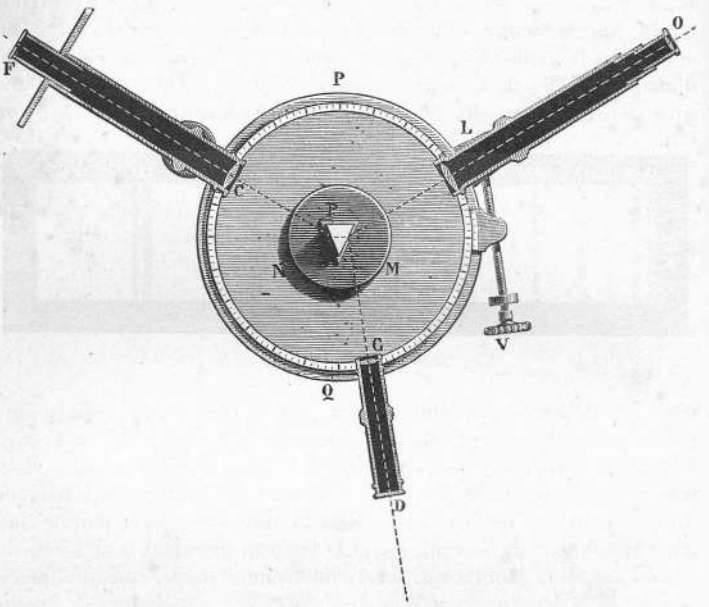


Fig. 381. — Spectroscope.

limbe un *tube micrométrique* DG. A l'extrémité D est une plaque de verre bien éclairée, sur laquelle est gravée une petite échelle formée de traits fins, parallèles à l'arête du prisme; à l'autre extrémité G est une lentille qui fonctionne encore comme un collimateur, envoyant sur la deuxième face du prisme, en faisceaux parallèles, les rayons émis par les traits du micromètre : ces rayons sont réfléchis par cette face, et viennent former dans la lunette l'image aérienne du micromètre, laquelle se superpose à celle du spectre et est vue en même temps. Les diverses régions du spectre peuvent alors être caractérisées par les divisions du micromètre auxquelles elles correspondent.

549. Spectres des lumières artificielles. — Quand on échauffe progressivement un corps *solide* ou *liquide*, en observant au spectroscope la lumière qu'il émet, on constate que, à la température du rouge naissant, le spectre se compose presque uniquement de rayons rouges,

c'est-à-dire des rayons les moins réfrangibles; puis, à mesure que la température s'élève, on voit apparaître dans le spectre, à la suite du rouge, des rayons orangés, puis des rayons jaunes, verts, etc., par ordre de réfrangibilité croissante; les rayons violets n'apparaissent nettement qu'à la *température blanche*. — En d'autres termes, le spectre s'étend d'une manière progressive, à mesure que l'incandescence du corps devient plus vive; mais le spectre de ces corps *solides* ou *liquides* est toujours un *spectre continu, sans intervalles obscurs*.

Au contraire, les corps *gazeux*, amenés à l'incandescence, émettent une lumière qui, décomposée par un prisme, donne un *spectre discontinu*, formé de raies brillantes se détachant sur un fond à peine lumineux (*). Ces lignes brillantes ont une couleur et une position *caractéristiques* pour chaque gaz en particulier.

Pour constater ces propriétés, qui distinguent les corps gazeux des corps solides ou liquides, il est indispensable d'opérer avec des corps *complètement gazeux*. — Pour obtenir un métal à l'état de gaz incandescent, il suffit de faire jaillir, entre deux pointes de ce métal, une série d'étincelles électriques : les particules métalliques vaporisées sont transportées à l'état d'incandescence, d'une pointe à l'autre. — Pour les métaux alcalins ou alcalino-terreux, on fait usage d'un bec de gaz, dit *brûleur de Bunsen*, dans lequel l'arrivée d'un courant d'air a pour effet de brûler complètement le charbon et de rendre la flamme à peine visible (**) : on introduit, à la base de la flamme, une petite cuillère de platine, contenant une parcelle d'un sel du métal soumis à l'expérience. — Enfin, les gaz raréfiés contenus dans les tubes de Geissler (livre V, chap. VIII) sont rendus incandescents par le passage de courants d'induction.

550. Analyse spectrale. — Les différences qu'on observe entre les spectres produits par les divers corps, *à l'état de gaz* ou de vapeurs incandescentes, ont conduit à une méthode d'analyse, d'une extrême sensibilité. Si l'on observe au spectroscope la flamme d'un bec de Bunsen, dans laquelle on a introduit un fil de platine humecté avec un sel métallique volatil, on voit apparaître, dans le spectre, des lignes brillantes, *caractéristiques* de la nature du métal. C'est ainsi que la présence du sodium est accusée par une double raie jaune, très brillante; celle du lithium, par une raie rouge et par une raie jaune différente de la raie du sodium, etc.

(*) Les raies vont en s'élargissant, et le spectre tend à devenir continu, à mesure que le corps gazeux est porté à une température plus élevée; ou bien encore, à mesure que l'on opère sur des masses gazeuses de plus en plus denses.

(**) Quand on observe au spectroscope les flammes de gaz tenant en suspension des particules solides, on obtient des spectres continus, parce que l'éclat des particules solides incandescentes l'emporte sur l'éclat du gaz lui-même. Ainsi, les flammes de nos bougies, de nos lampes, qui doivent leur propriété éclairante aux parcelles de charbon mises en liberté pendant la combustion, donnent toujours des spectres continus, dans lesquels certaines parties ont seulement une intensité prédominante.

Enfin, l'apparition de raies particulières, n'appartenant à aucun des métaux déjà connus, a conduit presque immédiatement MM. Kirchhoff et Bunsen à la découverte de deux nouveaux métaux, le cæsium et le rubidium, qui ont ensuite été isolés par eux, au moyen de procédés chimiques. — Bientôt après, un troisième métal, le thallium, signalé en Angleterre par M. Crookes, sur la simple apparition d'une raie verte spéciale, a été isolé en France par M. Lamy. — Plus récemment encore, un nouveau métal, le gallium, a été découvert d'une manière semblable par M. Lecoq de Boisbaudran.

551. Expérience du renversement des raies. — Voici maintenant une expérience, qui a été faite pour la première fois par Foucault, et qui a conduit M. Kirchhoff à une théorie de la formation des raies obscures du spectre solaire.

Quand on éclaire la fente d'un spectroscope au moyen de la lumière blanche émise par un corps solide porté à une haute température (charbons de l'arc voltaïque, lumière de Drummond) on observe un spectre très brillant et *absolument continu*. — Si maintenant on interpose, sur le trajet de cette lumière blanche, devant la fente du spectroscope, une flamme d'alcool salé, on voit apparaître, dans le spectre, une bande *obscure*, occupant exactement la même position que la bande jaune, brillante, que l'on observerait si la fente du spectroscope était seulement éclairée par la vapeur de sodium portée à l'incandescence (c'est la position de la raie obscure D du spectre solaire).

De cette expérience il résulte qu'une flamme contenant un sel de sodium, en même temps qu'elle a la propriété d'*émettre* exclusivement des rayons jaunes, possède aussi la propriété d'*absorber* la lumière jaune émise par une source lumineuse plus intense, sans absorber les autres couleurs que contient cette lumière. — De même, le chlorure de lithium, placé dans une flamme non éclairante, donne un spectre remarquable par une ligne rouge *brillante*, qui correspond à peu près au milieu de l'intervalle compris entre les raies B et C de Fraunhofer. Cette flamme, placée sur le trajet du faisceau lumineux produit par la lumière de Drummond, fait apparaître, dans le spectre de cette lumière, une raie *obscure* correspondante.

Ces résultats ont été rattachés par M. Kirchhoff à un principe qui avait été établi par l'expérience, pour la chaleur rayonnante en particulier (617), le principe de *l'égalité du pouvoir émissif et du pouvoir absorbant* d'un même corps, pour des rayons d'une espèce déterminée. — En généralisant ce principe, on devra raisonner comme il suit. Puisque la flamme de l'alcool salé donne, à la température de sa combustion, un spectre dans lequel prédomine une bande jaune, cette flamme n'a de pouvoir émissif sensible, à cette température, que pour les radiations jaunes : par suite, si l'on fait tomber sur cette flamme les radiations émanées d'une autre source, elle ne doit avoir de pouvoir

absorbant que pour les radiations jaunes : son pouvoir absorbant pour toutes les radiations d'une autre couleur doit être sensiblement nul. Dès lors, lorsque le faisceau de la lumière de Drummond traverse cette flamme, les rayons jaunes de ce faisceau perdent une partie considérable de leur intensité; d'autre part, les rayons jaunes émis par la flamme elle-même, qui est à une température plus basse, n'ont pas une intensité qui compense la perte d'éclat du faisceau transmis. On doit donc bien obtenir, dans la région du spectre qui correspond aux rayons de cette couleur, une bande *obscure*, tranchant sur les autres couleurs dont l'éclat n'est pas sensiblement amoindri.

Cette explication s'étend à toutes les expériences semblables, c'est-à-dire à toutes celles dans lesquelles on produit le phénomène qui est aujourd'hui désigné sous le nom de *renversement des raies*.

552. Explication de la production des raies du spectre solaire, d'après M. Kirchhoff. — Pour expliquer la production des raies obscures dans le spectre de la lumière solaire, il suffit d'admettre, avec M. Kirchhoff, que le noyau solide ou liquide de l'astre est enveloppé d'une *photosphère* gazeuse, dont l'éclat est notablement inférieur au sien. Sans la présence de cette photosphère, le noyau enverrait une lumière qui produirait un spectre continu (549); mais la photosphère se comporte, par rapport à la lumière émise par le noyau, comme la flamme d'alcool salé par rapport à la lumière émise par la chaux incandescente, c'est-à-dire que la lumière du noyau perd, en traversant la photosphère, la plus grande partie des rayons dont la réfrangibilité correspond à ceux que la photosphère émet elle-même.

M. Kirchhoff a déterminé, avec le plus grand soin, la position des raies obscures du spectre solaire, pour la comparer à celle des raies brillantes des corps connus : on voit, en effet, que si l'on constate une coïncidence exacte entre certaines raies *obscures* du spectre solaire et les lignes *brillantes* fournies par un corps à l'état gazeux, on en pourra conclure la présence de ce corps dans la photosphère du soleil. De là, la possibilité d'une véritable *analyse de l'atmosphère solaire*, analyse qui a déjà fourni les résultats les plus remarquables. — L'hydrogène, le sodium, le calcium, le magnésium, le fer, le chrome, le zinc, font partie de l'atmosphère du soleil : pour le fer, en particulier, cette assertion est fondée sur la concordance entre un nombre considérable de raies brillantes du spectre fourni par le métal en vapeur, et des raies obscures observées dans le spectre solaire.

553. Raies telluriques. — Certaines bandes obscures, observées dans le sceptre solaire, doivent être considérées comme ayant pour origine l'absorption de certains rayons lumineux par l'atmosphère de la Terre : elles augmentent d'intensité quand le soleil s'approche de l'horizon, parce que la couche d'air traversée par les rayons solaires est alors plus épaisse. Ces bandes ont reçu le nom de *raies telluriques*.

M. Janssen a montré qu'on peut faire apparaître, dans le spectre d'une lumière artificielle, celles de ces raies telluriques qui sont situées de part et d'autre de la raie D, en faisant traverser à cette lumière une couche épaisse de vapeur d'eau : c'est donc surtout à la présence de la vapeur d'eau dans notre atmosphère qu'il faut attribuer la production des raies telluriques voisines de la raie D. D'ailleurs, ces mêmes raies semblent diminuer par un temps sec et froid, lorsque l'atmosphère ne contient qu'une très faible quantité de vapeur d'eau.

M. Janssen a également montré que d'autres raies telluriques, appartenant aux groupes A et B, peuvent apparaître dans le spectre d'une lumière artificielle, quand cette lumière a traversé une couche épaisse d'oxygène comprimé. Ces autres raies telluriques seraient dues à l'absorption, par l'oxygène de l'air, des radiations correspondantes.

554. Résultats relatifs à l'étude physique des corps célestes. — Les *planètes* ne nous renvoyant que la lumière qu'elles reçoivent du Soleil, on devait s'attendre à retrouver, dans leurs spectres, les mêmes lignes obscures que dans le spectre solaire : c'est ce que confirme l'observation. — Mais une étude attentive a montré que les spectres fournis par Jupiter et par Saturne présentent, même quand ces astres sont bien au-dessus de notre horizon, des raies correspondantes à celles que produit la présence de la vapeur d'eau dans l'atmosphère terrestre. On est ainsi conduit à admettre, comme d'autres observations l'avaient déjà fait penser, qu'il existe, à la surface de ces planètes, de grandes nappes d'eau, entretenant leur atmosphère dans un état d'humidité continuelle. — Quant à la Lune, l'analyse spectrale, aussi bien que les autres modes d'observation, indique qu'elle n'a pas d'atmosphère.

Les *étoiles* émettant une lumière propre, l'étude des spectres qu'elles fournissent présente un intérêt tout particulier. — Pour toutes les étoiles proprement dites, on obtient des spectres *continus*, sillonnés de raies obscures : ces astres sont donc constitués, comme le Soleil, par un noyau solide ou liquide, entouré d'une atmosphère absorbante. La nature chimique de cette atmosphère pourra être révélée par la position des lignes obscures, dans le spectre de chacune d'elles.

Quant aux *nébuleuses non résolubles*, c'est-à-dire dans lesquelles les instruments les plus puissants ne distinguent qu'une sorte de nuage lumineux, elles fournissent, en général, un spectre formé de quatre lignes brillantes, se détachant sur un fond obscur. Cette apparence est celle qui caractérise les corps entièrement gazeux : deux des raies brillantes appartiennent à l'hydrogène; les deux autres peuvent être attribuées à l'azote et au baryum.

CHAPITRE V

VISION. — INSTRUMENTS D'OPTIQUE. VITESSE DE LA LUMIÈRE.

I. — VISION.

555. Structure de l'œil. — Le *globe de l'œil* offre, chez l'homme, à peu près la forme d'une sphère : la figure 382 en représente une coupe, par un plan vertical dirigé d'avant en arrière. — L'enveloppe de ce globe est formée par une membrane blanche et opaque SS, à laquelle sa consistance a fait donner le nom de *sclérotique* (σκληρός, dur). — A la partie antérieure, la sclérotique est remplacée par une membrane incolore et transparente C, qui présente une courbure un peu plus prononcée que la sclérotique : on lui donne le nom de *cornée transparente*, pour la distinguer de la sclérotique, qu'on nomme aussi quelquefois *cornée opaque*.

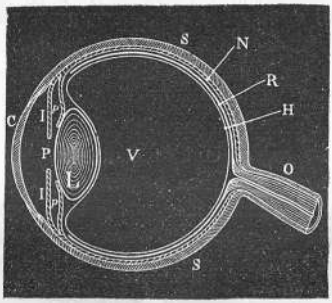


Fig. 382. — Coupe du globe de l'œil

A l'intérieur du globe, derrière la cornée et à une petite distance, se trouve une cloison membraneuse verticale, perpendiculaire à l'axe de l'œil : c'est l'*iris* I,I, percé en son centre d'une ouverture circulaire, la *pupille* P. La membrane de l'iris offre, chez les divers individus, des colorations différentes, variant du bleu au brun le plus foncé. — Derrière la pupille, à une très petite distance, se trouve une lentille convergente, le *cristallin* L : cette lentille est formée de couches superposées, dont les indices de réfraction vont en croissant des parties superficielles aux parties profondes ; elle est maintenue en avant par les *procès ciliaires p, p*.

La cavité du globe est ainsi séparée, par le cristallin et les procès ciliaires, en deux cavités. — La première, située en avant du cristallin, est remplie d'une humeur limpide et incolore, l'*humeur aqueuse*. — La

seconde, qui occupe les deux tiers postérieurs de l'œil, renferme un liquide plus consistant : c'est l'*humeur vitrée*, entourée par la *membrane hyaloïde* H.

Enfin, par la partie postérieure du globe de l'œil, pénètre un nerf remarquable par sa grosseur, le *nerf optique* O. Ce nerf, après avoir traversé la sclérotique, s'épanouit en une membrane mince, la *rétine* R : celle-ci est séparée de la sclérotique, dont elle suit le contour, par une couche de matière noire ou *pigment*, supportée par une membrane intermédiaire, la *choroïde* N.

556. Actions exercées par les diverses parties de l'œil sur les rayons lumineux. — Les rayons lumineux émis sur le globe de l'œil par un point extérieur, après avoir traversé la cornée transparente C, pénètrent dans l'humeur aqueuse en subissant une déviation vers l'axe. Les rayons les plus rapprochés de l'axe pénètrent au travers de la pupille; ceux qui s'en écartent davantage sont interceptés par l'iris, qui joue ainsi le rôle d'une sorte de diaphragme par rapport au cristallin (*) : c'est la diffusion de ces rayons sur l'iris qui rend cette membrane visible à l'extérieur, avec la coloration qui lui est propre.

Les rayons qui ont traversé la pupille tombent sur le cristallin, qui les fait converger sur la rétine (**) : l'impression produite sur cette membrane nerveuse est transmise par le nerf optique, et donne naissance à la sensation lumineuse.

557. Formation des images au fond de l'œil. — Si l'on prend un œil de bœuf et que, après avoir aminci la sclérotique jusqu'à la rendre transparente à sa partie postérieure, on place une bougie à 30 ou 40 centimètres en avant de la cornée, on voit, en regardant par derrière, se peindre sur le fond de l'œil une image *renversée* de la bougie.

L'ensemble des milieux de l'œil se comporte donc comme un *système convergent*, dont le centre optique C (*fig.* 386) serait à une petite distance de la face postérieure du cristallin et dont le foyer principal serait sur la rétine. — Si l'on considère un objet lumineux AB, placé à une distance suffisamment grande, les rayons émanés de cet objet vont former sur la rétine une image A'B', qui est *renversée et plus petite que l'objet.*

(*) L'ouverture de la pupille éprouve des variations de grandeur qui sont surtout en rapport avec l'éclat de la lumière qui arrive à l'œil. Lorsque l'on considère avec attention un œil fixé sur un objet peu lumineux, on constate que l'ouverture de la pupille s'agrandit, de manière à laisser arriver sur le cristallin le plus grand nombre possible de rayons. Au contraire, quand l'œil regarde un objet très brillant, la pupille se resserre, afin de diminuer la quantité de lumière qui, en arrivant sur la rétine, produirait sur elle une impression pénible.

(**) Le cristallin étant formé de couches successives, dont l'indice de réfraction va en décroissant à mesure qu'elles s'éloignent du centre, les rayons les plus distants de l'axe sont moins déviés que si la lentille présentait partout le même indice de réfraction qu'au centre. On conçoit donc que les rayons émanés d'un même point puissent concourir en un foyer, sans aberration de sphéricité appréciable.

Malgré ce *renversement de l'image*, nous voyons les objets dans leur situation véritable. Il en faut simplement conclure que les éléments nerveux de la rétine et du nerf optique possèdent des propriétés physiologiques telles, que si un point A′ de la rétine se trouve au point de concours d'un faisceau lumineux convergent, nous *rapportons* la position du point extérieur, d'où émane le faisceau divergent qui lui a donné naissance, en l'un des points de l'axe secondaire A′CA : il en est de même de B′ et de tous les autres points de la rétine (*).

558. Vision à différentes distances. — Distance minimum de la vision distincte. — L'expérience de chaque jour montre que, pour les vues *normales*, l'œil est constitué de manière à donner, pour une distance très grande de l'objet, une image rétinienne nette; ainsi, pour de pareilles vues, quand l'atmosphère est bien transparente, la lune apparaît avec des contours bien arrêtés : c'est ce qu'on appelle la *vision à l'infini*. — A mesure que les objets se rapprochent, la vision peut encore conserver sa netteté, par une *accommodation* progressive de l'œil, dont le mécanisme réside principalement dans un changement de courbure des faces du cristallin, s'effectuant sous l'influence des contractions des parties musculaires, qui l'assujettissent sur son contour (**) : le cristallin devenant ainsi plus convergent, l'image peut encore se former sur la rétine, malgré la diminution de la distance de l'objet.

D'après cela, les diverses particularités de la vision à différentes distances sont faciles à concevoir : — Pour les objets très éloignés, la vision est nette, mais les petits *détails* des objets ne sont pas perceptibles, parce que l'image rétinienne totale est extrêmement petite par rapport à l'objet, et que les points de l'objet qui sont voisins les uns

(*) Si quelques personnes croient trouver une difficulté dans la position renversée de l'image, c'est qu'elles tendent toujours à assimiler l'image formée sur la rétine aux images que nous obtenons sur des écrans extérieurs, et que nous percevons comme nous percevrions des objets. Cette assimilation n'a évidemment aucune raison d'être.

(**) Ces changements de courbure peuvent être manifestés de la manière suivante. Lorsqu'on présente une bougie à l'œil d'une personne placée dans une chambre obscure, on distingue en regardant l'œil au moyen d'une loupe fixée au fond d'un tube, trois images de la bougie. — Celle de ces trois images qui est la plus rapprochée du spectateur est *droite et virtuelle* ; c'est celle qui a été observée par tout le monde, et qui est formée par la réflexion des rayons sur la convexité de la cornée (500). Celle qui est la plus éloignée est également *droite et virtuelle*; elle est due à la réflexion sur la face antérieure du cristallin. Enfin, on aperçoit, entre les deux précédentes, une image *renversée et réelle* qui est produite par la réflexion sur la concavité de la face postérieure du cristallin (494, 1°). — Or si, laissant toujours la bougie en présence de l'œil, on fait regarder successivement, à la personne en expérience, d'abord un objet très éloigné, puis un objet situé à 15 ou 20 centimètres, on voit la première image de la bougie rester fixe, ce qui indique que la cornée ne change pas de forme. Mais, au moment où l'œil se fixe sur l'objet rapproché, on voit la seconde image droite s'avancer vers le spectateur, ce qui prouve que la face antérieure du cristallin devient *plus convexe*; l'image renversée éprouve aussi un petit déplacement, accusant une faible variation de courbure de la face postérieure.

des autres forment leurs foyers en des points extrêmement voisins. Or, la rétine est constituée par des éléments nerveux qui ont des diamètres appréciables (0,005 de millimètre environ) : si un même élément correspond aux foyers de plusieurs points de l'objet, il ne peut transmettre qu'une impression unique. — L'objet se rapprochant jusqu'à la distance d'environ 50 centimètres, à laquelle on place un livre pour lire, les *détails* deviennent de plus en plus faciles à distinguer, parce que l'image rétinienne grandit, et que les images des points voisins se séparent de plus en plus. Dans ces conditions, la vision se fait encore *sans fatigue*, les modifications des courbures du cristallin étant à peu près insensibles (*). — Enfin, quand l'objet s'approche jusqu'à environ 15 centimètres, distance *minimum* de la vision distincte pour les vues normales, la grandeur de l'image rétinienne continuant à augmenter, les détails de l'objet deviennent de plus en plus distincts; mais alors l'accommodation de l'œil, nécessaire pour que l'image se forme encore sur la rétine, est accompagnée d'une fatigue toujours sensible à la longue. — Là s'arrête la faculté d'accommodation : si l'on continue à rapprocher davantage l'objet, l'image tend à se former au delà de la rétine. Chacun des faisceaux lumineux émis par les divers points de l'objet produit alors sur la rétine un cercle, dont le diamètre est d'autant plus grand que l'objet est plus voisin de l'œil : ces cercles empiètent les uns sur les autres, et la vision devient confuse.

559. Principales espèces de vue. — Besicles. — On appelle vues *normales*, ou vues *emmétropes*, celles dont il a été question jusqu'ici : le foyer principal de l'œil étant situé sur la rétine, ces vues distinguent nettement, *sans effort*, les objets placés à l'infini; elles peuvent encore distinguer nettement, *par accommodation*, les objets placés à des distances décroissantes, jusqu'à 15 centimètres environ.

On appelle vues *presbytes*, ou vues *longues*, celles qui perçoivent nettement, à peu près comme les vues normales, les objets très éloignés, mais qui s'en distinguent en ce que, les fibres musculaires qui assujettissent le cristallin ayant à peu près perdu la faculté de se contracter, la faculté d'accommodation est limitée à une distance notablement supérieure à 15 centimètres.

On appelle vues *myopes*, ou vues *courtes*, celles qui ne peuvent voir que d'une manière confuse les objets éloignés, le foyer principal de l'œil étant situé *en avant de la rétine*. Quand l'objet se rapproche à une distance inférieure à quelques mètres, l'image vient se former sur la rétine, et la vision devient nette. Enfin, par accommodation, ces vues peuvent encore distinguer nettement des objets placés à des distances inférieures à 15 centimètres.

(*) Le calcul montre que le plan de l'image se déplace d'environ 2 dixièmes de millimètre (c'est à peu près l'épaisseur de la rétine), quand l'objet se déplace depuis l'infini jusqu'à une distance de 50 centimètres.

On appelle *vues hypermétropes*, celles qui ne peuvent jamais percevoir que d'une manière confuse les objets situés à une distance finie, le foyer principal de l'œil hypermétrope étant situé *en arrière de la rétine.* Les rayons émanés d'un point placé à une distance finie iraient toujours former leur image derrière la rétine, au delà du foyer principal, à une distance d'autant plus grande que le point lumineux est plus rapproché. — Quand l'hypermétropie n'est pas très prononcée, l'œil hypermétrope peut voir, par accommodation, les objets extrêmement éloignés; mais la vision ne peut jamais être bien distincte, et elle exige toujours un effort.

L'emploi des *besicles*, appelées vulgairement *lunettes*, est destiné à modifier les conditions de la vision, pour les vues presbytes, myopes ou hypermétropes, de manière à rendre ces conditions aussi semblables que possible à celles des vues normales.

1° Soit A (*fig.* 383) un point lumineux placé sur l'axe d'un œil *presbyte*, à une distance inférieure à celles auxquelles il peut voir distinctement. Plaçons devant cet œil une lentille *convergente* LL′, dont la distance focale soit assez grande pour que le foyer principal F se trouve au delà de A : elle diminuera la divergence des rayons qui tombent sur l'œil, et tout se passera comme si ces rayons émanaient d'un point P situé de l'autre côté de F (530, 5°). Il suffira donc que les courbures de la lentille soient convenablement choisies, pour que P se trouve à une distance à laquelle cet œil puisse voir distinctement les objets.

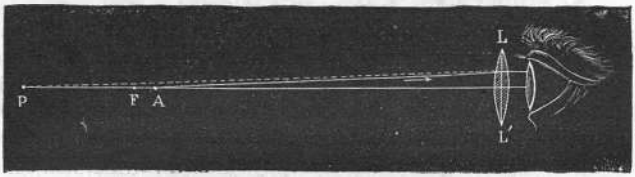


Fig. 383. — Vue presbyte.

2° Soit A (*fig.* 384) un point lumineux placé sur l'axe d'un œil *myope*, à une distance supérieure à celles auxquelles il peut voir distinctement. Plaçons devant cet œil une lentille *divergente* LL′ : elle augmentera la

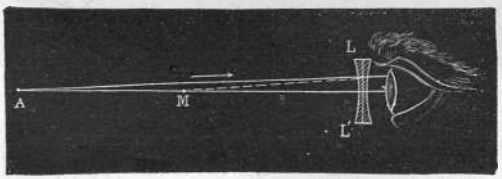


Fig. 384. — Vue myope.

divergence des rayons qui arrivent à l'œil, et tout se passera comme si ces rayons émanaient d'un point M, situé plus près de l'œil (535). Donc, si les courbures de la lentille sont convenablement choisies, ce point M pourra se trouver à l'une des distances auxquelles la vision est distincte, pour la vue myope dont il s'agit.

3° Soit A (*fig.* 385) un point lumineux placé sur l'axe d'un œil *hyper-*

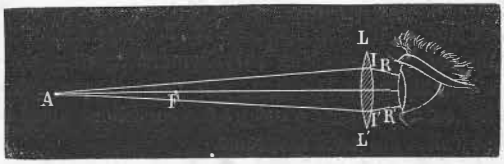


Fig. 385. — Vue hypermétrope.

métrope : les rayons divergents AI, AI', après réfraction par les milieux de l'œil, iraient converger *derrière la rétine*, et la vision du point A serait confuse. Plaçons devant cet œil une lentille convergente LL', dont la distance focale soit assez petite pour que le foyer principal F se trouve en deçà de A; après réfraction par la lentille, le faisceau divergent AI, AI' sera remplacé par un faisceau convergent IR, I'R'; et l'on conçoit que les rayons d'un pareil faisceau, après réfraction par les milieux de l'œil, iront se couper entre le centre optique et le foyer principal de l'œil. Si la distance focale de la lentille est convenablement choisie, l'image du point A pourra se former sur la rétine même.

560. Diamètre apparent. — Estimation des grandeurs relatives des objets placés à une même distance. — On désigne sous le nom de *diamètre apparent* d'un objet linéaire AB (*fig.* 386), dans une posi-

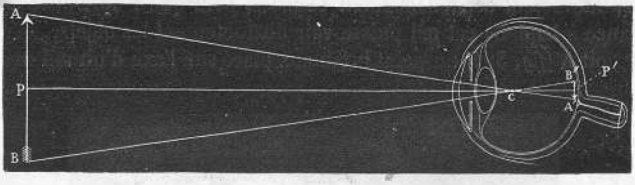


Fig. 386. — Diamètre apparent d'un objet.

tion déterminée, l'*angle* ACB *formé par les droites menées du centre optique de l'œil aux extrémités de l'objet.*

Pour nous rendre compte de cette dénomination, concevons divers objets tels que AB, placés *à une même distance* CP, et assez petits par rapport à CP pour que l'angle ACB soit toujours très petit lui-même. Pour chacun de ces objets, la dimension de l'image A'B' sur la rétine,

dimension à laquelle il est naturel de donner le nom de *diamètre apparent*, est telle que l'on ait $\frac{A'B'}{CP'} = \frac{AB}{CP}$; or $\frac{AB}{CP}$ n'est autre chose que le double de la tangente de l'angle ACP, ou sensiblement, eu égard à la petitesse des angles, la mesure de l'angle ACB lui-même. On peut donc écrire

$$A'B' = CP' \times \text{angle ACB};$$

dès lors, pour divers objets, si la distance CP reste constante, la dimension A'B' de l'image rétinienne est proportionnelle à la valeur de l'angle ACB. — Quand l'œil compare deux objets *situés à une même distance*, c'est par le rapport de leurs diamètres apparents qu'il juge du rapport des grandeurs des objets eux-mêmes.

Remarquons d'autre part que, si un même objet est placé successivement à diverses distances, son diamètre apparent diminue à mesure qu'il s'éloigne. Il est donc impossible que l'œil apprécie, par la seule comparaison des diamètres apparents, les rapports de grandeurs de plusieurs objets situés *à des distances différentes*; avec cette notion seule, et sans la notion des distances, il serait exposé aux erreurs les plus grossières.

561. Axe visuel. — Angle optique. — Estimation des distances. — Pour observer dans les meilleures conditions possibles tels ou tels points de l'espace, l'œil se dirige toujours de façon que les images viennent se former sur une petite dépression, située au milieu de la tache jaune, et où les éléments nerveux de la rétine sont plus rapprochés que dans toute autre région. — On nomme *axe visuel*, la droite qui passe par le centre optique de l'œil et par le centre de cette petite dépression.

Quand les deux yeux sont dirigés simultanément vers un point, on appelle *angle optique* l'angle que forment entre eux les axes visuels des deux yeux.

Si maintenant on regarde, avec les deux yeux, des points placés à des distances diverses, l'angle optique est d'autant plus petit que le point considéré est plus éloigné. — Pour chacun de nous, le sens du toucher a donné au sens de la vue une sorte d'éducation, d'après laquelle nous avons conscience de la valeur de l'angle que font les axes visuels de nos deux yeux, quand ils sont fixés, par exemple, sur un point situé à 30 ou 40 centimètres; à mesure que cet angle devient plus petit, nous jugeons que la distance qui nous sépare du point augmente.

Mais ces évaluations deviennent incertaines quand il s'agit de points très éloignés; l'angle optique est alors très petit, et ne varie plus que de quantités insensibles avec la distance. — C'est ainsi que nous ne pouvons nous faire aucune idée de la distance d'une étoile, ni même d'un phare placé sur une côte un peu éloignée.

562. Évaluation des grandeurs absolues des objets. — C'est en combinant les données qui nous sont fournies, comme on vient de le voir, d'une part sur les *diamètres apparents* des objets, d'autre part sur les *distances* qui nous en séparent, que nous jugeons de leur grandeur. — Ce jugement n'est réellement susceptible de quelque précision, que si le faible éloignement des objets nous permet d'en évaluer la distance avec assez d'exactitude.

Lorsque les objets sont *très éloignés*, nous arrivons encore à en apprécier la distance, au moins d'une manière approximative, par leur éclat relatif : la lumière qui arrive à l'œil, subit en effet, dans l'atmosphère, une absorption progressive qui en diminue l'intensité. Chaque observateur, selon l'expérience qu'il a acquise, arrive ainsi à une sûreté de jugement plus ou moins grande. Mais ce jugement peut être mis singulièrement en défaut, lorsque l'atmosphère présente une transparence beaucoup plus grande ou beaucoup plus faible que celle à laquelle l'œil est accoutumé : on peut être alors amené à des erreurs d'évaluation considérables. — En revanche, si, parmi les objets observés, il s'en trouve un de dimensions connues, un homme, un cheval, etc., l'évaluation de la distance acquiert immédiatement une précision plus grande, par la perception du diamètre apparent de cet objet particulier. — C'est ce qui justifie l'emploi des objets animés dans la peinture de paysages, pour contribuer, avec les dégradations de teintes, à rendre plus complètes les illusions de perspective.

563. Unité de l'impression produite par les deux yeux. — Lorsque nos deux yeux sont fixés simultanément sur un même point lumineux, nous ne voyons, en général, malgré la formation des deux images, qu'un seul point.

L'observation a montré que cette *unité d'impression* exige la réunion de deux conditions physiques ; il faut : 1° que les axes des deux yeux convergent vers le point lumineux ; 2° que les images produites sur les deux rétines occupent des positions rigoureusement correspondantes. — Si ces conditions ne sont pas simultanément réalisées, la sensation est double. C'est ainsi que, si l'on vient à déranger l'axe de l'un des yeux, en exerçant sur lui une légère pression, les objets paraissent doubles. C'est ainsi encore que, si nos deux yeux sont dirigés vers un point situé à une distance déterminée, dans le plan de symétrie de notre corps, tout point situé dans ce même plan, mais à une distance plus grande ou plus petite, nous paraît double.

564. Appréciation du relief. — Stéréoscope. — Les corps qui présentent des reliefs, lorsqu'ils sont placés à une petite distance, ne produisent pas, dans les deux yeux, des images identiques : les deux yeux n'ayant pas la même position par rapport à l'objet, l'un d'eux peut apercevoir certains points qui sont masqués pour l'autre, et réciproquement. — Ce sont ces deux sensations, produites *simultanément*

par deux images un peu différentes, qui donnent lieu à la perception du relief.

La meilleure preuve qu'on en puisse fournir est l'illusion qu'on éprouve, quand on a laissé quelques instants les yeux fixés sur les images du *stéréoscope*. — Les deux figures (dessins ou photographies) que l'on place dans l'instrument, en face des verres grossissants, ne sont pas identiques : elles reproduisent les deux aspects sous lesquels on verrait l'objet lui-même, placé à une distance convenable, en le fixant *successivement* avec chacun des deux yeux. L'effet de l'instrument est de diriger les rayons provenant de ces deux figures, comme s'ils partaient d'un objet unique, situé entre elles, et à une distance telle que la vision soit distincte. L'illusion du relief est complète, quand les images sont bien construites et quand l'instrument est bien adapté à la vue de l'observateur.

II. — INSTRUMENTS D'OPTIQUE.

565. Microscope solaire. — Le microscope solaire est destiné à donner des images réelles et considérablement agrandies d'objets très petits.

La partie essentielle de l'appareil est une lentille convergente LL′ (*fig.* 387) ayant une très petite distance focale principale ; f et f' sont

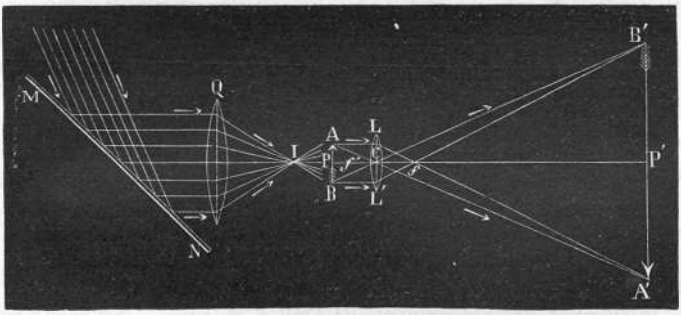


Fig. 387. — Microscope solaire.

ses deux foyers. L'objet AB fixé entre deux lames de verre maintenues par un *porte-objet*, est placé en face de cette lentille, à une distance CP un peu supérieure à la distance focale principale Cf' : il se forme une image réelle et renversée A′B′, beaucoup plus grande que l'objet : on la reçoit sur un écran, dans la chambre obscure où sont placés les spectateurs. La figure 387 indique la construction géométrique de l'image (530). — On fait varier la distance de la lentille LL′ à l'objet de

manière à *mettre au point*, c'est-à-dire à obtenir sur l'écran une image aussi nette que possible.

La lentille Q et le miroir MN constituent un *système éclairant*. En effet, l'image A'B' étant beaucoup plus grande que l'objet, il est indispensable d'éclairer fortement l'objet, pour que l'image ait un éclat suffisant. — Les rayons du soleil, reçus sur le miroir plan MN qui est placé à l'extérieur de la pièce où se fait l'observation, sont réfractés par la lentille Q, en son foyer : l'objet est placé un peu au-delà (*).

Nous appellerons *agrandissement linéaire*, le rapport de deux dimensions homologues de l'image et de l'objet. La figure montre que l'on a $\frac{A'B'}{AB} = \frac{A'B'}{LL'} = \frac{fP'}{fC}$. Dès lors, pour une même lentille, on obtiendra un agrandissement linéaire d'autant plus grand, que la distance fP' de l'écran au foyer sera plus grande. Pour une position déterminée de l'écran, l'agrandissement linéaire sera d'autant plus grand que la distance focale fC sera plus petite. — Pour le mesurer, on peut introduire dans l'appareil, à la place de l'objet AB, un *micromètre* consistant en une lame de verre sur laquelle le constructeur a tracé, à l'aide d'une machine spéciale, des traits distants entre eux d'un centième de millimètre. Si la distance des images de deux traits consécutifs, sur l'écran, est de 2 millimètres, on en conclura que l'agrandissement linéaire est représenté par 200 (**).

La *lanterne magique*, dont l'invention, due au P. Kircher, remonte au XVII^e^ siècle, repose sur les mêmes principes que le microscope solaire ; elle donne des images réelles et amplifiées de divers objets, peints ou photographiés sur des lames de verre. — L'éclairement est ordinairement produit par une lampe, munie d'un réflecteur, et par une lentille convergente qui concentre la lumière sur la lame de verre. L'agrandissement étant bien moindre que dans le microscope solaire, cet éclairement donne encore à l'image un éclat suffisant.

566. Loupe. — La *loupe* est une lentille convergente, que l'on place entre l'œil et les objets pour en mieux distinguer les détails.

Pour concevoir l'utilité de la loupe, on remarquera que, lorsqu'on cherche à distinguer *à l'œil nu* les détails d'un objet, on est conduit à le rapprocher progressivement de l'œil : chacune des dimensions linéaires de l'image rétinienne, ou le *diamètre apparent* de cette dimension (560), grandit en raison inverse de la distance. Mais, pour que la vision soit nette, il faut que l'objet soit toujours placé à une distance

(*) A défaut de la lumière solaire, on peut employer des lumières artificielles d'une grande intensité, comme la lumière de Drummond ou la lumière électrique.

(**) L'*agrandissement superficiel*, c'est-à-dire le rapport entre la surface de l'image et celle de l'objet, est égal au rapport des carrés de leurs dimensions homologues ; en d'autres termes, l'agrandissement superficiel est exprimé par le *carré de l'agrandissement linéaire*. Ainsi, dans l'exemple précédent, l'agrandissement superficiel serait représenté par 40 000.

au moins égale à la distance minimum D de la vision distincte (558). — L'interposition d'une lentille convergente, de longueur focale f plus petite que D, a pour effet de substituer à l'objet une image virtuelle, dont le diamètre apparent est supérieur à celui qu'aurait l'objet vu à l'œil nu.

Soit LL′ une lentille convergente (*fig.* 388), C son centre optique, F et F′ ses foyers principaux. D'après ce qu'on a vu (550, 5°), pour

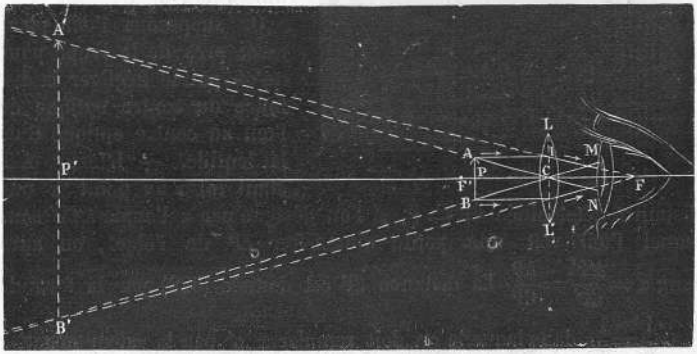


Fig. 388. — Formation des images dans la loupe.

qu'un objet AB donne une image virtuelle, il faut que la distance CP soit moindre que la distance focale principale CF′; la figure 388 indique la construction géométrique de cette image. L'œil, placé dans le voisinage immédiat de la loupe, reçoit la plus grande partie des faisceaux lumineux émis sur la lentille par les divers points de AB, comme s'ils émanaient des points correspondants de A′B′.

Pour *mettre au point*, on règle la distance CP de l'objet à la lentille, en diminuant progressivement cette distance, jusqu'à ce que les détails de l'image A′B′ arrivent à se distinguer autant que possible les uns des autres, l'image conservant toujours sa netteté. — La distance de l'image à l'œil est alors sensiblement égale à la distance minimum D de la vision distincte (*)

La figure 389, dans laquelle on a supposé, pour plus de simplicité, le centre optique de l'œil confondu avec le centre optique C de la lentille, montre que le diamètre apparent A′CB′ de l'image est plus grand que le diamètre apparent aCb qu'aurait l'objet, s'il était vu à l'œil nu, à la même distance, en ab. Par suite, certains détails de l'objet, qui échap-

(*) Les mesures précises montrent que, pour que l'observation à la loupe puisse se continuer sans fatigue, il faut que la distance de l'image à l'œil soit un peu supérieure à D.

peraient à l'observation directe, pourront devenir perceptibles dans l'observation à la loupe.

567. Puissance d'une loupe. — Une loupe doit être considérée comme d'autant plus puissante, qu'elle permet de distinguer nettement de plus petits détails d'un objet; ou, en d'autres termes, qu'elle permet de voir sous un angle plus grand une dimension déterminée de l'objet.

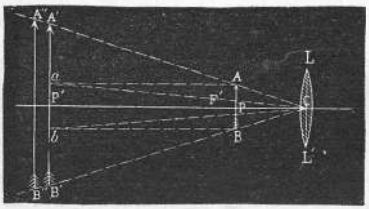


Fig. 389.

Or supposons l'œil placé assez près de la loupe pour qu'on puisse négliger la distance du centre optique de l'œil au centre optique C de la lentille. — L'image A'B' étant mise au point à une distance déterminée CP' = D, si l'on désigne par α l'angle A'CP' sous lequel l'œil voit une petite dimension AP de l'objet, on aura $\text{tang}\,\alpha = \frac{A'P'}{CP'} = \frac{AP}{CP}$. La distance CP est donnée (529) par la formule $\frac{1}{p} + \frac{1}{p'} = \frac{1}{f}$, dans laquelle on doit remplacer p' par la valeur négative — D, ce qui donne

$$\frac{1}{p} - \frac{1}{D} = \frac{1}{f} \quad \text{ou} \quad \frac{1}{p} = \frac{1}{f} + \frac{1}{D};$$

en remplaçant $\frac{1}{CP}$ par cette valeur de $\frac{1}{p}$, il vient

$$\text{tang}\,\alpha = \left(\frac{1}{f} + \frac{1}{D}\right) AP.$$

On remarquera d'abord que, dans la parenthèse, le second terme est d'autant plus grand que la distance D de l'image à l'œil est plus petite. De là résulte, d'une part, que chaque observateur aura avantage à placer l'image à la distance *minimum* de sa vue; d'autre part, que, si cette condition est remplie, le diamètre apparent sous lequel apparaîtra la dimension AP de l'objet sera *plus grand pour un œil myope que pour un œil presbyte.*

Mais, ce qu'il faut remarquer surtout, c'est que, des deux termes de la parenthèse, le premier est toujours le plus grand : si la loupe est *à court foyer,* on pourra même considérer $\frac{1}{D}$ comme négligeable par rapport à $\frac{1}{f}$ et prendre comme mesure très approchée de tang α, ou

de l'angle α lui-même, l'expression $\frac{1}{f}$. AP (*). — C'est la valeur de ce coefficient $\frac{1}{f}$ pour chaque loupe, qui caractérise *la puissance* de la loupe elle-même : la puissance d'une loupe est exprimée par un nombre qui est *l'inverse de sa distance focale* (évaluée en mètres). Une petite dimension quelconque z de l'objet (évaluée en mètres) pourra être vue, au travers de cette loupe, sous un angle mesuré approximativement par le produit $p.z$ (**).

Dans la pratique, pour distinguer des détails de plus en plus petits, on fait usage de loupes ayant des puissances croissantes : d'après ce qu'on vient de voir, la puissance est d'autant plus grande que la loupe est *à plus court foyer*. — Mais on ne peut diminuer la distance focale d'une lentille mince, qu'en augmentant la courbure de ses faces, et en diminuant le diamètre de la loupe elle-même (le plus ordinairement, le diamètre de la loupe est à peu près égal à la moitié de sa distance focale). Dès lors, les loupes qui présentent un grand diamètre, comme B (*fig.* 390), sont des loupes peu puissantes; celles qui ont un petit diamètre, comme A, ont une puissance plus grande.

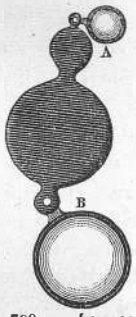


Fig. 390. — Loupes.

Quand on emploie des loupes très puissantes, comme celles qui servent aux études d'histoire naturelle, on les fixe le plus ordinairement à un support, au-dessus d'un *porte-objet* dont on peut régler la distance à la loupe au moyen d'une crémaillère, pour mettre au point. L'objet étant ainsi installé dans une position fixe, l'opérateur a les deux mains libres, pour les opérations de dissection. — L'appareil ainsi construit reçoit quelquefois le nom de *microscope simple*.

(*) Si l'on suppose l'œil placé de manière que son centre optique coïncide avec le foyer F de la loupe (*fig.* 388), tang α a pour mesure $\frac{A'P'}{FP'}$, ou $\frac{IC}{FC}$ ou enfin $\frac{AP}{f}$. Dans cette position de l'œil, l'évaluation précédente de tang α n'est donc plus seulement approximative, mais rigoureuse. — On verra plus loin que cette position est précisément celle qu'il faut donner à l'œil, par rapport à l'oculaire fonctionnant comme loupe, dans le microscope ou dans la lunette astronomique (575 et 580).

(**) Soit, par exemple, une loupe ayant pour distance focale $0^m,04$; sa puissance est $p = \frac{1}{0,04}$, ou $p = 25$, — Une longueur de $0^m,001$ sera vue sous un angle mesuré approximativement par $0,001 \times 25$, ou 0,025. Si l'on veut évaluer cet angle en minutes, on remarquera que l'angle d'une minute a sensiblement pour mesure $\frac{1}{3438}$; en divisant donc 0,025 par $\frac{1}{3438}$, on obtient, pour la valeur de α, environ 86′.

568. Grossissement d'une loupe, pour une vue déterminée. — On appelle *grossissement d'une loupe, pour un observateur déterminé*, le rapport du diamètre apparent sous lequel cet observateur voit, au travers de la loupe, une dimension déterminée de l'objet, à l'angle sous lequel il verrait cette même dimension à l'œil nu, à la distance minimum de sa vue.

D'après ce qui précède, si p est la puissance de la loupe, l'angle sous lequel une dimension z de l'objet est vue *au travers de la loupe* a sensiblement pour mesure zp. Pour un observateur déterminé, cette même dimension z, vue *à l'œil nu*, et placée à la distance minimum D, serait vue sous un angle mesuré par $\frac{z}{D}$, angle d'autant plus grand que la distance D qui caractérise sa vue est plus petite. Le *grossissement* G, c'est-à-dire le rapport de ces deux angles, est donc exprimé, pour l'observateur dont il s'agit, par

$$G = p.D \qquad \text{ou} \qquad G = \frac{D}{f}.$$

On voit donc que le grossissement produit par une loupe de puissance déterminée n'est pas le même pour un myope que pour un presbyte. — Le myope, quand il observe à l'œil nu, place l'objet à une distance D moindre que le presbyte; par suite, il distingue, *à l'œil nu*, des détails que ne peut distinguer le presbyte. Mais le grossissement qui est produit, *pour lui*, par une loupe déterminée, c'est-à-dire le progrès qu'il réalise par l'adjonction de cette loupe à son œil, est moindre qu'il ne le serait pour un presbyte.

569. Défaut d'achromatisme de la loupe simple. — Loupes composées. — La marche des rayons lumineux qui traversent une loupe semble indiquer, au premier abord, que l'achromatisme doit se produire de lui-même, et que jamais les images ne doivent paraître irisées. Si, en effet, l'image formée par les rayons rouges partis du point A (*fig.* 389) vient se faire en un point A′ de l'axe secondaire AC, l'image formée par les rayons violets partis du même point devra se produire en un point A″ du même axe secondaire. Le centre optique de l'œil étant supposé très près du point C, les deux images du point A seront vues dans la même direction CAA′A″ et paraîtront se superposer. — Cependant, l'expérience montre que les contours des images données par la loupe sont toujours irisés, et d'autant plus que les courbures des deux faces sont plus prononcées; cette dernière observation montre que le défaut d'achromatisme est dû à l'aberration de sphéricité (523), laquelle n'est pas la même pour les rayons rouges que pour les rayons violets.

En employant, au lieu d'une lentille, une *loupe composée*, c'est-à-dire un système de deux lentilles présentant des courbures moindres, et fixées à peu de distance l'une de l'autre, on peut obtenir, à puissance égale, des images bien moins irisées.

570. Microscope composé. — Le *microscope composé* est formé par la réunion d'un *objectif* convergent, disposé de manière à donner une image réelle, plus grande que l'objet, et d'un *oculaire* fonctionnant par

rapport à cette image aérienne comme une loupe, c'est-à-dire lui substituant une image virtuelle qui est encore agrandie (*).

La figure 391 indique la marche des rayons : *ll'* est l'objectif, dont les foyers sont en *f* et en *f'*; LL' est l'oculaire, dont les foyers sont en F et F'. — L'objet AB, placé à une distance Pc de l'objectif *un peu supérieure à la distance focale principale f'c*, donne une image réelle A_1B_1, renversée et agrandie. L'oculaire LL' est placé à une distance P_1C de l'image A_1B_1, *inférieure à sa distance focale principale* F'C; les rayons qui se sont croisés aux différents points de l'image aérienne A_1B_1 se comportent, par rapport à l'oculaire, comme s'ils émanaient d'un objet placé en A_1B_1 : il se forme une image virtuelle A'B', visible pour l'œil placé au delà de l'oculaire. — On *met au point* en réglant la distance Pc, de manière que l'image virtuelle vienne se former sensiblement *à la distance minimum de la vision distincte.*

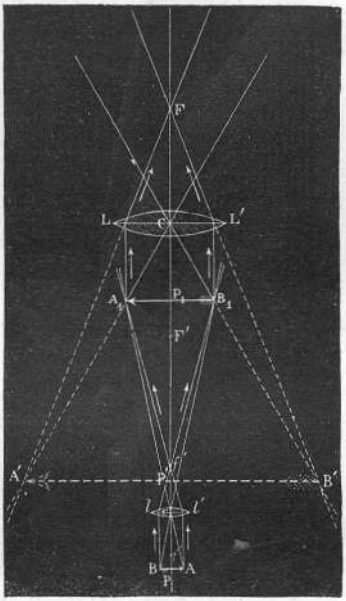


Fig. 391. — Formation des images dans le microscope composé.

571. Détails de construction microscope. — L'oculaire et l'objectif sont assujettis dans un tube métallique AB, supporté par un collier C (*fig.* 392); les objets, placés entre deux lames de verre mince, sont déposés sur la plaque P ou *porte-objet*, au-dessus de l'ouverture circulaire pratiquée en son milieu. Lorsque les objets sont transparents, on les éclaire en dessous, au moyen du miroir concave M, sur lequel on reçoit la lumière des nuages ou celle d'une lampe, et qui renvoie cette lumière dans l'ouverture du porte-objet. Lorsque les objets sont opaques, on les éclaire par la partie supérieure, au moyen d'une lentille convergente placée latéralement. — Le collier C, qui soutient le tube du microscope, est fixé à la colonne creuse D; une vis V, placée dans l'axe de cette colonne, permet de faire monter ou descendre la colonne elle-même, de manière à éloigner ou à rapprocher le tube AB du porte-objet, pour mettre au point.

(*) L'invention du microscope composé remonterait, suivant certains auteurs, au XVI^e siècle, et serait due au lunetier Zacharias Jansen, de Middelbourg; suivant d'autres, elle serait due au naturaliste Leuwenhœck, et daterait du XVII^e siècle.

L'objectif B est, en général, formé de deux ou trois lentilles à très court foyer, montées dans des garnitures métalliques qui s'adaptent les unes aux autres. L'oculaire A est également formé de deux lentilles convergentes, constituant une *loupe composée*. — On a, pour un même instrument, plusieurs systèmes d'objectifs et d'oculaires, que l'on peut substituer les uns aux autres pour faire varier la puissance de l'instrument.

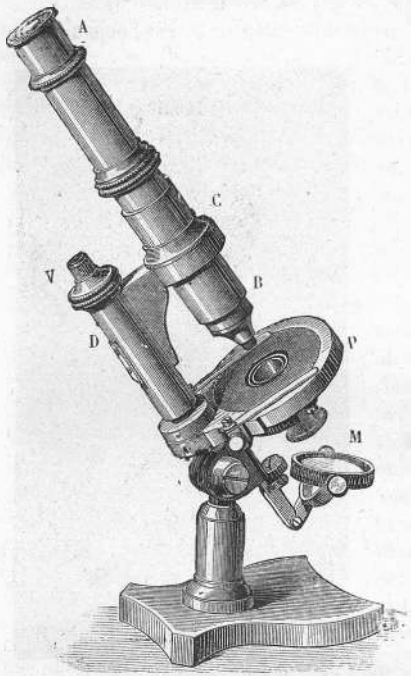


Fig. 392. — Microscope composé.

572. Puissance d'un microscope. — Un microscope, de même qu'une loupe, doit être considéré comme d'autant plus puissant, qu'il permet de voir sous un angle plus grand une dimension déterminée de l'objet.

Or supposons que le centre optique de l'œil soit placé au foyer F (*fig.* 391) de la lentille oculaire (*). Si l'on désigne par α l'angle A'FP' sous lequel il voit l'image A'P' de la dimension AP de l'objet, on a $\text{tang } \alpha = \frac{A'P'}{FP'} = \frac{LC}{FC} = \frac{A_1P_1}{FC}$; ce qu'on peut écrire

$$\text{tang } \alpha = \left(\frac{A_1P_1}{AP} \times \frac{1}{FC}\right) AP.$$

Or, dans la parenthèse, le premier facteur représente l'agrandissement, par rapport à l'objet, de l'image réelle formée par l'objectif *ll'* (565); le second facteur représente la puissance de l'oculaire (567), fonctionnant comme loupe par rapport à cette image aérienne. — Dès lors, en confondant toujours l'angle α avec sa tangente, on devra considérer la *puissance* P du microscope comme représentée par un coefficient, caractéristique de l'instrument lui-même, et *égal au produit de l'agrandissement dû à son objectif, par la puissance de son oculaire.*

(*) On verra plus loin (575) que c'est la position que doit occuper l'œil, pour embrasser tout le champ de l'instrument.

573. Mesure expérimentale de la puissance d'un microscope, au moyen de la chambre claire. — La figure 393 représente une *chambre claire* que l'on peut adapter aux microscopes, et qui permet d'obtenir une mesure expérimentale de la puissance.

Un petit miroir métallique *mn*, percé d'une ouverture, se fixe, au moyen d'une bague métallique, au-dessus de l'oculaire L, de manière à être incliné d'environ 45 degrés sur l'axe du tube : un prisme à réflexion totale *abc* est disposé latéralement, de manière que sa face hypoténuse soit sensiblement parallèle à *mn*. L'œil placé en O reçoit, au travers de l'ouverture du miroir *mn*, les rayons émis par l'objet AB et transmis par l'instrument. D'autre part, si l'on dispose une feuille de papier P au-dessous du prisme *abc*, à une distance sensiblement égale à la distance minimum D de la vision distincte, les rayons envoyés par cette feuille, se réfléchissant sur la face hypoténuse *ac*, puis sur le miroir *mn*, arrivent à l'œil suivant les mêmes directions que les rayons venus de l'objet. Pour l'observateur, l'image virtuelle de l'objet semble donc se peindre sur la feuille de papier elle-même (*).

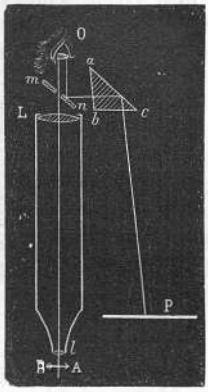


Fig. 393. — Chambre claire adaptée au microscope.

Pour mesurer la puissance P de l'instrument, on place sur le porte-objet un micromètre, divisé en centièmes de millimètre, comme celui qui a été décrit précédemment (565), et l'on dispose sur la feuille de papier une règle divisée en millimètres, de manière que l'image des divisions du micromètre se projette sur la règle. — Supposons que 3 divisions de la règle soient couvertes par 1 division grossie du micromètre. Le diamètre apparent sous lequel l'œil voit, dans la chambre claire, ces 3 divisions de la règle, c'est-à-dire une longueur de $0^m,003$, a pour mesure $\frac{0,003}{D}$ (en supposant D évalué en mètres). Le diamètre apparent sous lequel l'œil voit, dans le microscope, une division du micromètre, de longueur $0^m,00001$, a pour mesure $0,00001 \times P$. En égalant ces deux diamètres apparents, on en déduit $P = \frac{0,003}{0,000\,01 \times D}$, ou $P = \frac{300}{D}$. Si la distance D est de $0^m,20$, la puissance est $\frac{300}{0,20}$, ou 1500. — Quelle que soit la vue de l'observateur qui effectue cette détermination, l'expérience fournit toujours sensiblement la même valeur pour la puissance, car le nombre des divisions de la règle couvertes par

(*) On peut ainsi suivre avec la pointe d'un crayon, sur le papier, les contours des images, et en obtenir un dessin fidèle.

une division grossie du micromètre croît proportionnellement à la distance D.

574. Grossissement d'un microscope, pour une vue déterminée. — Pour le microscope, comme pour la loupe, on appelle *grossissement, pour un observateur déterminé*, le rapport du diamètre apparent sous lequel cet observateur voit, dans le microscope, une dimension déterminée de l'objet, à l'angle sous lequel il verrait cette même dimension à l'œil nu, à la distance minimum de sa vue.

Soit P la puissance du microscope, quantité caractéristique de l'instrument lui-même, et soit D la distance minimum de la vision distincte, pour l'observateur dont il s'agit. L'angle sous lequel une petite dimension z de l'objet est vue *dans l'instrument* a sensiblement pour mesure zP. L'angle sous lequel cet observateur verrait cette même dimension, *à l'œil nu* et à la distance D, a pour mesure $\frac{z}{D}$; il est d'autant plus grand que la distance D qui caractérise sa vue est plus petite. Le grossissement G, c'est-à-dire le rapport de ces deux angles, est donc exprimé, pour l'observateur dont il s'agit, par

$$G = P.D.$$

Les remarques que nous avons faites sur le grossissement produit par la loupe (568) s'appliquent donc au microscope. — Les observateurs les plus myopes (c'est-à-dire ceux pour lesquels la distance D a la plus petite valeur) sont ceux qui obtiennent, par l'emploi d'un microscope de puissance déterminée, le moindre accroissement du diamètre apparent sous lequel ils voient les objets à l'œil nu, à la même distance.

575. Champ du microscope. — Point oculaire. — Le *champ* d'un microscope est l'espace dans lequel doit être compris un point extérieur, pour que son image puisse être vue par l'œil placé à l'oculaire.

Soient ll' l'objectif (*fig.* 391), LL' l'oculaire, A un point de l'objet et A_1 son foyer conjugué par rapport à l'objectif. Les rayons qui concourent à la production de l'image A_1 forment, avant la réfraction, un faisceau divergent qui a pour sommet A et pour base ll'; après la réfraction, un faisceau convergent qui a pour base ll' et pour sommet A_1. Pour que le point A soit compris dans le champ, il suffira donc que ce dernier faisceau rencontre l'oculaire. Or le faisceau lA_1l' est toujours formé de rayons qui s'écartent très peu de son axe cA_1; on peut donc dire que la condition, au moins approximative, pour que le point A soit compris dans le champ, c'est que la droite Ac, menée du point A au centre optique de l'objectif, aille rencontrer l'oculaire. — De là résulte enfin que, si l'on imagine un cône ayant son sommet au centre optique c de l'objectif et s'appuyant sur les bords de l'oculaire LL', la nappe inférieure de ce cône sera la *limite du champ*.

Si maintenant on considère les rayons qui forment les axes des faisceaux lumineux correspondants aux divers points du champ, ces rayons, passant tous au centre optique *c* de l'objectif, se comportent comme s'ils émanaient du point *c* lui-même, et viennent ensuite, après avoir été réfractés par l'oculaire, passer par le foyer conjugué de *c* par rapport à LL'; et comme la distance cC de l'objectif à l'oculaire est toujours assez grande par rapport à la longueur focale CF de l'oculaire, le foyer conjugué de *c* est situé très peu au delà du foyer F. — C'est donc en ce point que doit être placé le centre optique de l'œil, pour embrasser le champ tout entier. C'est pourquoi ce point reçoit le nom de *point oculaire*. — L'instrument porte un *œilleton*, formé par une plaque métallique placée devant l'oculaire et percée d'une ouverture contre laquelle l'œil doit être appliqué.

576. Lunette astronomique. — La lunette astronomique comprend, comme le microscope composé, un *objectif* convergent, donnant une image réelle de l'objet, et un *oculaire* convergent, faisant fonction de loupe, et donnant une image virtuelle qui est contemplée par l'œil (*).

Quand la lunette astronomique est destinée à l'observation d'objets lumineux très éloignés, tels que les astres, l'objectif doit avoir une *surface* aussi grande que possible, afin d'admettre la plus grande quantité possible de lumière, contribuant à la formation de l'image réelle. Or, une lentille ne peut avoir une grande surface qu'à la condition d'avoir de grands rayons de courbure et, par suite, une *distance focale* considérable. — Il faut aussi remarquer que, quand on observe un objet de diamètre apparent sensible (une planète ou un objet terrestre), l'image réelle fournie par l'objectif, dans le plan focal principal, est d'autant plus grande que la distance focale de l'objectif est plus grande. — De là, la longueur qu'on est conduit à donner aux lunettes astronomiques, longueur d'autant plus grande que l'instrument est plus grossissant.

La figure 394 rend compte de la formation des images. Soient L l'objectif et L' l'oculaire; l'objet est supposé à gauche de L et très éloigné. L'image A_1B, réelle, renversée, et très diminuée, se forme dans le plan focal principal de l'objectif : sur la figure, on s'est borné à tracer les axes secondaires ACA_1 et BCB_1 de ses extrémités. L'oculaire L', à travers lequel on regarde l'image aérienne A_1B_1, a son foyer principal F un peu à gauche de cette image; il substitue à cette image une image virtuelle A'B', droite par rapport à A_1B_1, c'est-à-dire renversée par rapport à l'objet.

L'impossibilité où l'on est de changer la distance de l'objet à l'instrument, comme on le faisait pour le microscope, oblige ici à faire mouvoir l'oculaire, pour *mettre au point*. — L'objectif, formé par un système de

(*) L'invention de la *lunette astronomique* paraît due à Zacharias Jansen, et remonte aux dernières années du XVI^e^ siècle.

lentilles achromatiques, est assujetti en A, à l'extrémité d'un gros tube de métal AB (*fig.* 395); dans l'autre extrémité B, s'engagent deux

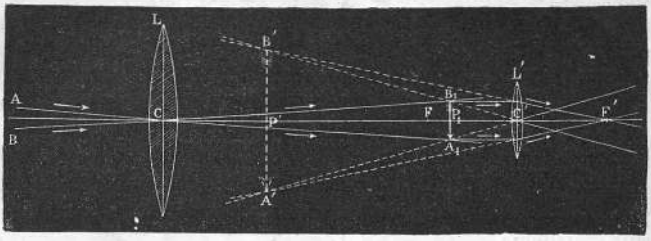


Fig. 394. — Formation des images dans la lunette astronomique.

tirages CD et EF, c'est-à-dire deux tubes de diamètres plus petits, dont le dernier porte l'oculaire F. Cet oculaire est toujours, comme dans le microscope, un *oculaire composé*. — Pour obtenir une image aussi parfaite que possible, on commence par faire glisser le tube EF dans le tube CD, jusqu'à ce que l'image apparaisse avec une certaine netteté; on achève ensuite de mettre au point, en imprimant au tube CD de petits

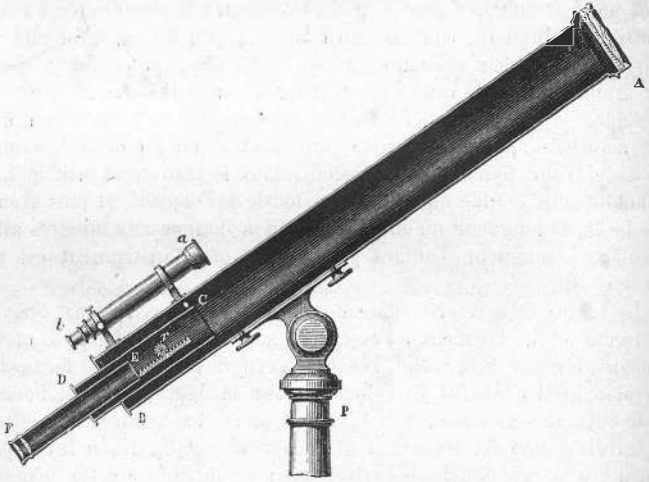


Fig. 395. — Lunette astronomique.

déplacements, au moyen de l'engrenage *r* qui correspond à un bouton extérieur.

577. Grossissement d'une lunette astronomique. — On appelle *grossissement* d'une lunette astronomique, le rapport du diamètre apparent de l'une des dimensions de l'image, vue dans l'instrument, au diamètre apparent de la dimension homologue de l'objet vu à l'œil nu.

Mais ici, la distance de l'objet ne pouvant pas varier au gré de l'observateur, il est nécessaire de considérer le diamètre apparent de l'objet tel qu'il est vu, sans instrument, *dans sa position réelle*.

Pour évaluer le diamètre apparent de la dimension A'B' de l'image virtuelle vue au travers de l'oculaire (*fig.* 394), supposons que le centre optique de l'œil soit *au foyer principal* F' de la lentille (*). Le demi-diamètre apparent de l'image A'B', ou l'angle B'F'P', a pour mesure $\frac{B'P'}{F'P'}$ ou $\frac{L'C'}{F'C'}$; c'est-à-dire $\frac{B_1P_1}{f}$, en remarquant que L'C' est égal à B_1P_1, et en désignant par f la distance focale de l'oculaire; le diamètre apparent de l'image est donc exprimé par $\frac{A_1B_1}{f}$. — Pour évaluer le diamètre apparent de la dimension homologue AB de l'objet, vu sans instrument, nous supposerons, eu égard à la grande distance de cet objet, que l'œil soit transporté au centre optique C de l'objectif : il voit alors la dimension AB sous l'angle ACB, dont la valeur est $\frac{A_1B_1}{C\,P_1}$, c'est-à-dire $\frac{A_1B_1}{F}$, en désignant par F la distance focale de l'objectif. Le grossissement linéaire G est donc exprimé par le rapport de $\frac{A_1B_1}{f}$ à $\frac{A_1B_1}{F}$, c'est-à-dire que l'on a

$$G = \frac{F}{f} \quad (**).$$

Le grossissement est donc d'autant plus grand, que F est lui-même plus grand par rapport à f; c'est là une remarque importante, sur laquelle nous reviendrons plus loin.

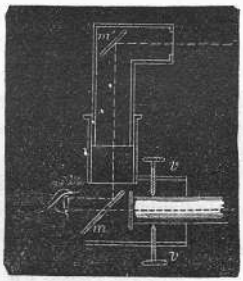


Fig. 396.

578. Mesure expérimentale du grossissement. — Pour mesurer le grossissement d'une lunette, on peut employer une sorte de chambre claire, analogue à celle qui nous a servi pour mesurer la puissance du microscope composé (573) et dont la figure 396 indique la disposition. On installe, à une grande distance de l'instrument, une échelle divisée; l'œil, placé comme l'indique la figure 396, voit l'échelle à travers la lunette, par l'ouverture du miroir *m*, tandis que les rayons réfléchis successive-

(*) On verra plus loin (580) que c'est cette position qu'il faut donner à l'œil, pour embrasser tout le champ de l'instrument.

(**) Lorsqu'on suppose, comme on le fait souvent, que le centre optique de l'œil se confond avec le *centre optique de l'oculaire*, on trouve, pour valeur du grossisse-

ment par les deux miroirs m' et m la font voir telle qu'elle apparaîtrait à l'œil nu. Le grossissement est donné par le nombre n de divisions, vues par réflexion, qui se superposent à une seule division vue à travers la lunette.

579. Réticule. — Fixation de l'axe optique. — Dans les recherches astronomiques, les lunettes servent surtout à déterminer exactement les *directions* dans lesquelles se trouvent les astres, par rapport à l'observateur, à un moment donné. Il est donc nécessaire de fixer, dans l'instrument lui-même, une *ligne de visée*.

Pour arriver à ce résultat, on place à l'intérieur du tube, dans le plan même où se forme l'image *réelle* fournie par l'objectif, un *réticule* (*fig.* 397), c'est-à-dire un diaphragme présentant une ouverture circulaire dans laquelle sont tendus deux fils très fins, perpendiculaires entre eux : ce sont ordinairement des fils d'araignée. — Pour viser un astre, on dirige la lunette de façon que l'œil, placé derrière l'oculaire, voie l'image de cet astre coïncider avec le point de croisement des fils. Il ne peut en être ainsi, que si l'astre lui-même est situé dans le prolongement de la droite qui passe par le point de croisement des fils et par le centre optique de l'objectif (527). — Par suite, le point de croisement des fils détermine, avec le centre optique de l'objectif, une droite qui doit être considérée comme liée à la lunette elle-même, et qui sert à définir la ligne de visée. — C'est cette droite qu'on nomme l'*axe optique* de la lunette (*).

Fig. 397. Réticule.

Des cercles gradués, sur lesquels se meuvent les lunettes, servent à mesurer les angles dont on doit déplacer leur axe optique pour passer d'un astre à un autre.

580. Champ de la lunette. — Point oculaire. — Le *champ* d'une lunette astronomique est l'espace dans lequel doit être compris un point extérieur pour que son image soit visible dans la lunette. Il est limité par la nappe antérieure d'un cône ayant son sommet au centre optique de l'objectif, et s'appuyant sur les bords de l'ouverture circulaire du diaphragme (*fig.* 397).

Il en résulte que le champ est d'autant plus petit que la distance focale principale de l'objectif est plus grande, c'est-à-dire que le grossissement, $G = \frac{CP_1}{C'P_1}$, ou $\frac{F}{C'P_1}$. Si, de plus, on suppose l'œil adapté *pour la vision à une très grande distance*, l'image A_1B_1 doit, pour être vue distinctement dans l'oculaire, être placée très près de son foyer. — C'est ce qu'on exprime quelquefois en disant que l'expression $\frac{F}{f}$ donne la valeur du grossissement *pour un œil infiniment presbyte*.

(*) La *lunette du cathétomètre* (*fig.* 20) n'est autre chose qu'une lunette astronomique, disposée pour la vision d'objets rapprochés; c'est, en quelque sorte, un instrument intermédiaire entre la lunette astronomique et le microscope composé. L'axe optique y est déterminé, comme dans la lunette astronomique, par un réticule placé dans le plan où se fait l'image réelle donnée par l'objectif.

sement de la lunette est plus considérable (577). Aussi est-il difficile, avec les lunettes très grossissantes, de trouver, sur la voûte céleste, un astre déterminé, faute de pouvoir amener simultanément dans le champ les autres astres qui serviraient de repères. C'est pourquoi on adjoint, aux grandes lunettes, une *lunette chercheur ab* (*fig.* 395), ayant un grossissement beaucoup moindre et un champ beaucoup plus grand. L'axe optique du chercheur est rendu sensiblement parallèle à celui de la grande lunette : lorsqu'il est pointé sur un astre déterminé, celui de la grande lunette l'est au moins approximativement, et cet astre apparaît dans le champ.

Il y a, dans la lunette astronomique comme dans le microscope, un *point oculaire*, c'est-à-dire un point par lequel passent les rayons de tous les points du champ : c'est le foyer conjugué, par rapport à l'oculaire, du centre optique de l'objectif (575); il se confond sensiblement avec le deuxième foyer F' de l'oculaire (*fig.* 394). L'œil, placé de manière que son centre optique soit en F', voit le champ tout entier. — L'instrument porte, comme le microscope, un *œilleton*, formé par une plaque métallique placée devant l'oculaire et percée d'une ouverture contre laquelle l'œil doit être appliqué.

581. Divers systèmes d'oculaires composés, adaptés au microscope et à la lunette astronomique. — Les oculaires des microscopes et des lunettes sont toujours formés par un système de deux lentilles, constituant un *oculaire composé*. Une théorie complète montre que, si l'objectif de l'instrument est achromatique, c'est-à-dire s'il fournit une image réelle dénuée d'irisation, il est possible, par une disposition convenable des deux lentilles de l'oculaire composé, de faire en sorte que l'image virtuelle soit également dépourvue d'irisation. — Selon la position de ces lentilles par rapport à l'image fournie par l'objetif, le système prend le nom d'*oculaire négatif* ou d'*oculaire positif*.

1° L'*oculaire négatif* peut être considéré comme différant d'un oculaire simple LL' (*fig.* 398) par l'addition d'une seconde lentille L_1L_1', placée entre l'objectif *ll'* et le plan où viendraient se former les images réelles : de là résulte que l'image réelle d'un point tel que *m* n'est plus au point *m'* où l'objectif tendait à la former, mais en un point m'_1, situé entre le point *m'* et le centre optique C_1 : c'est ce point m_1' que l'on regarde au travers de la lentille LL' (*).

2° L'*oculaire positif* n'est autre chose qu'une *loupe composée*, formée de deux lentilles convergentes, qui sont situées l'une et l'autre au delà de l'image réelle donnée par l'objet. Cette image réelle peut donc ici se former; on la regarde au travers du système des deux verres.

Pour le microscope, on emploie généralement un oculaire *négatif* particulier, connu sous le nom d'*oculaire d'Huyghens* : dans cet oculaire, la dis-

(*) Cette lentille $L_1L'_1$ est quelquefois désignée sous le nom de *verre de champ*, ou de *lentille collective*. On voit, en effet, que l'interposition de cette lentille ramène vers le centre C l'axe du faisceau provenant du point *m* qui vient rencontrer cette lentille. Il peut donc arriver que ce faisceau rencontre alors la lentille LL', lors même que la droite *cm'* ne la rencontrerait pas. Par suite, la présence de la lentille $L_1L'_1$ *augmente le champ* de l'instrument.

tance des deux lentilles est égale au double de la longueur focale de la lentille la plus voisine de l'œil, et aux deux tiers de celle de l'autre lentille. Cet oculaire est celui qui donne le champ le plus vaste, pour une puissance déterminée du microscope. — On l'emploie aussi dans la lunette astronomique, mais seulement quand la lunette ne doit pas être pourvue d'un réticule.

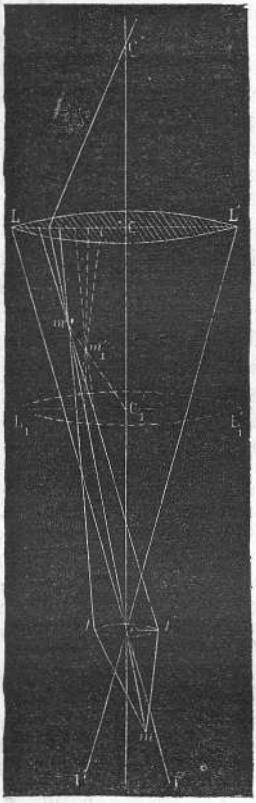


Fig. 398. — Oculaire négatif.

Lorsque la lunette astronomique doit servir à viser dans une direction bien définie, l'axe optique doit avoir toujours une même direction, par rapport à l'instrument. Or, cette condition serait difficilement réalisée avec un oculaire *négatif*; le réticule devrait alors être placé dans le plan où se forme la deuxième image réelle m'_1 (*fig.* 398), afin que l'œil situé derrière la lentille LL′ pût voir dans un même plan l'image virtuelle de m'_1 et l'image virtuelle du réticule; par suite, à chaque observation, les déplacements que l'on imprimerait à l'oculaire tout entier, pour mettre au point, auraient pour effet de modifier la direction de l'axe optique. — Le plus souvent, dans la lunette astronomique, on emploie un oculaire *positif* particulier, connu sous le nom d'*oculaire de Ramden* : il est formé de deux lentilles égales, séparées par une distance qui est les deux tiers de leur longueur focale commune.

582. Lunette terrestre. — Le renversement des images, qui n'a pas d'inconvénient dans les observations astronomiques, serait peu commode pour l'observation des objets terrestres. — On désigne sous le nom de *lunettes terrestres*, ou *longues-vues*, des lunettes qui diffèrent de la lunette astronomique par l'interposition, entre l'objectif et l'oculaire, d'un système de lentilles ayant pour but de substituer, à l'image réelle et renversée qui est fournie par l'objectif, une autre image *redressée*, par rapport à laquelle l'oculaire fonctionne toujours comme une loupe. — Voici la disposition qui est le plus souvent adoptée.

Au delà de l'image réelle et renversée A_1B_1 (*fig.* 399) qui est fournie par l'objectif (l'objectif est supposé à gauche, bien en dehors des limites de la figure), on place une première lentille C_1, à une distance de A_1B_1 *moindre que sa distance focale principale* C_1f_1; cette lentille substitue, à l'image réelle A_1B_1, une image virtuelle A_2B_2, qui est encore renversée par rapport à l'objet, et qui est plus grande que A_1B_1. Au delà de C_1 est une seconde lentille C_2, placée à une distance de A_2B_2 qui diffère peu

du *double de sa distance focale principale*; l'image A_2B_2 se comporte alors par rapport à cette lentille comme un objet, en sorte qu'elle donne en A_3B_3 une image *réelle*, renversée par rapport à A_2B_2, c'est-à-dire *redressée* par rapport à l'objet, et dont la grandeur diffère peu de celle

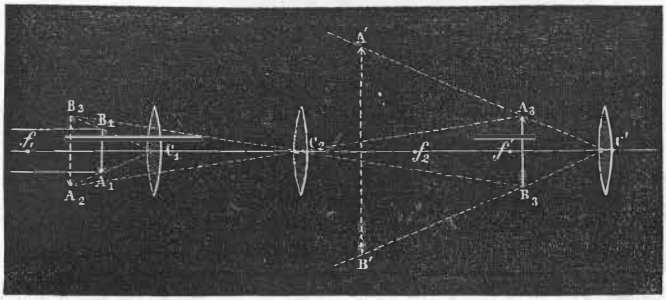


Fig. 399. — Oculaire terrestre.

de A_2B_2. — C'est cette image redressée qu'on regarde au travers de la lentille oculaire C', dont le foyer principal est en f', de manière qu'elle fonctionne comme une loupe, substituant à l'image A_3B_3 une image virtuelle et grossie A'B', droite par rapport à l'objet.

On donne le nom d'*oculaire terrestre* au système des trois lentilles C_1, C_2, C', qui sont fixées dans un même tube, mobile à tirage, de manière à permettre la mise au point. — L'ensemble des deux lentilles C_1 et C_2 a reçu le nom de *véhicule* (*).

583. Lunette de Galilée. — La lunette de Galilée, dans laquelle l'oculaire est une lentille *divergente*, permet d'obtenir une image droite sans l'interposition de verres supplémentaires, qui sont toujours une cause de perte de lumière, soit par absorption, soit en raison des

(*) Le redressement de l'image pourrait être produit par l'emploi d'*une seule* lentille complémentaire C_2, qui substituerait alors, à l'image réelle A_1B_1 fournie par l'objectif, une image réelle placée dans une position analogue à celle de A_2B_2 dans la figure 399. Mais il est facile de voir qu'il en résulterait une diminution considérable du champ. En effet, avec le système des deux lentilles C_1 et C_2, le champ est approximativement mesuré par l'angle d'un cône ayant pour sommet le centre optique de l'objectif (supposé à gauche de la figure 399), et pour base la surface de la lentille C_1; si, pour redresser l'image, on n'employait que la lentille C_2, la base du cône dont l'angle mesure le champ serait la surface de la lentille C_2; la base s'éloignant ainsi du sommet du cône, l'angle du cône serait notablement moindre. — Donc, en opérant le redressement au moyen d'un véhicule formé de *deux lentilles*, au lieu d'une seule, on a l'avantage *d'augmenter le champ*, ce qui est un point capital pour l'observation des objets terrestres.

Au lieu d'une seule lentille oculaire C' (*fig.* 399), on emploie le plus ordinairement un système de deux lentilles fonctionnant comme un *oculaire négatif* (581, 1°). — Le système connu sous le nom d'*oculaire terrestre* comprend alors, en définitive, quatre lentilles, assujetties dans un même tube à tirage.

réflexions partielles qui se produisent à chacune de leur surface. — On va voir, en outre, que la longueur de l'instrument est beaucoup réduite.

La figure 400 indique la marche des rayons lumineux. Soit A_1B_1

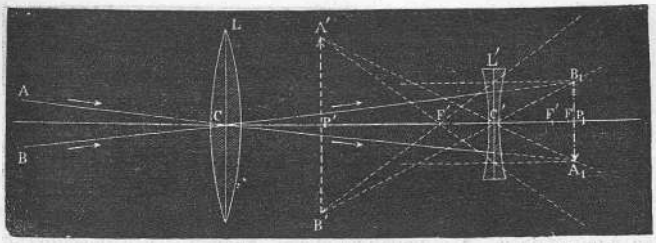


Fig. 400. — Lunette de Galilée.

l'image réelle et renversée que donnerait l'objectif L, un peu au delà de son foyer principal F. Plaçons l'oculaire divergent L' *entre cette image et l'objectif*, de manière que sa distance $C'P_1$ à l'image A_1B_1 soit un peu supérieure à sa distance focale principale C'F', et cherchons ce que deviennent alors les rayons qui seraient venus concourir en A_1. Considérons en particulier un rayon qui, passant par le point A_1, tomberait sur l'oculaire parallèlement à l'axe principal : en traversant l'oculaire divergent, ce rayon serait réfracté de manière que son prolongement géométrique vînt passer par le foyer principal virtuel situé en F', à gauche de la lentille (534) : il rencontre en A' l'axe secondaire $A_1C'A'$; c'est donc en A' que passent les prolongements de tous les rayons qui, sans l'interposition de l'oculaire, viendraient se croiser en A_1. On déterminera le point B' par une construction semblable. — De là résulte que l'œil, placé au delà de l'oculaire, voit en A'B' une image virtuelle, agrandie et renversée par rapport à A_1B_1, c'est-à-dire *droite* par rapport à l'objet lui-même (*).

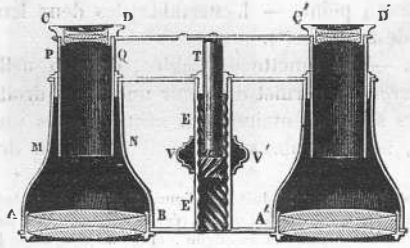


Fig. 401. — Lorgnettes jumelles.

(*) Dans la lunette de Galilée, l'image de l'objectif formée par l'oculaire est virtuelle; il n'existe donc pas, comme dans la lunette astronomique (580), une position de l'œil permettant de recevoir tous les rayons transmis par l'instrument. On a intérêt à placer l'œil *le plus près possible de l'oculaire*, afin de recevoir le plus grand nombre possible des rayons divergents qui en sortent. — Le champ varie avec la position de la pupille derrière l'oculaire.

584. Lorgnettes-jumelles. — Les lorgnettes de spectacle, ou *jumelles*, se composent de deux lunettes de Galilée, assujetties parallèlement. Les tubes qui portent les objectifs AB, A'B' (*fig.* 401) sont réunis par des traverses, à leurs deux extrémités. Les tubes à tirage qui portent les oculaires CD, C'D' sont réunis également par une traverse DC', de manière qu'on puisse faire mouvoir ensemble ces deux tubes à tirage, et les mettre simultanément *au point* pour les deux yeux. Il suffit, pour cela, de faire tourner sur lui-même le tube EE', au moyen de la molette saillante VV' que l'on tient entre les doigts : le pas de vis pratiqué intérieurement sur la paroi de ce tube fait alors mouvoir dans un sens ou dans l'autre la tige T, qui est fixée à la traverse DC' (*).

585. Télescope de Newton. — On comprend sous le nom de *télescopes*, des instruments où la lentille objective, qui, dans les lunettes, recevait la lumière des objets, est remplacée par un miroir concave.

Dans le télescope de Newton, un miroir sphérique concave MN (*fig.* 402) est fixé au fond d'un tube, de manière que son centre C soit

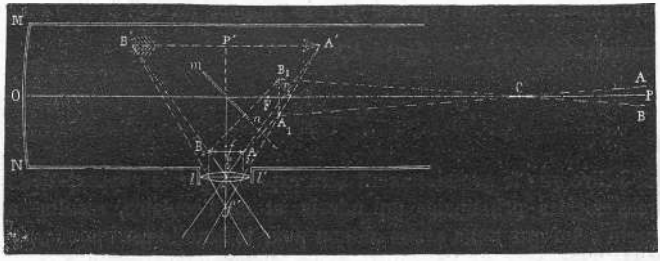


Fig. 402. — Télescope de Newton.

sur l'axe du tube. — L'axe du tube étant dirigé vers un objet, le miroir tendrait à produire, un peu au delà de son foyer principal F, une image A_1B_1 réelle et renversée (**) ; mais les faisceaux lumineux réfléchis, avant d'atteindre leurs points de concours respectifs, sont reçus sur un petit miroir plan *mn*, incliné à 45 degrés sur l'axe du tube ; ils sont réfléchis par ce miroir, en sorte que l'image se trouve rejetée dans une position A_2B_2 symétrique de A_1B_1 par rapport à *mn*. C'est cette image réelle A_2B_2 qu'on observe à travers l'oculaire *ll'*, fonctionnant comme loupe, et fixé dans un tube à tirage, sur le côté du tube : en réglant le tirage, on amène l'image virtuelle A'B' à apparaître nettement, pour la vue de l'observateur.

(*) Dans les bonnes lorgnettes, chacun des objectifs et des oculaires est ordinairement composé de trois lentilles, formant un système *achromatique*.

(**) Ici encore, on a supposé l'objet placé bien au delà des limites de la figure, et l'on s'est contenté de tracer les axes secondaires AC et BC, qui iraient passer par deux points extrêmes de l'objet : c'est sur ces axes que se trouvent les points correspondants A_1 et B_1 de l'image.

586. Grossissement du télescope. — Dans le télescope, le grossissement est défini, comme dans la lunette astronomique, par le rapport du diamètre apparent d'une dimension déterminée de l'image, vue dans l'instrument, au diamètre apparent de la dimension correspondante de l'objet, vu sans instrument. — Pour évaluer le diamètre apparent de la dimension A'B' de l'image virtuelle, on supposera, ici encore, le centre optique de l'œil placé au foyer principal de la lentille oculaire : en raisonnant comme plus haut (577), on trouvera que le diamètre apparent de A'B' peut être exprimé par $\frac{A_2B_2}{f}$, en désignant par f la distance focale de l'oculaire. — Pour évaluer le diamètre apparent de la dimension homologue AB de l'objet, on pourra, eu égard à la grande distance de l'objet, supposer l'œil placé au centre de courbure C du miroir : le diamètre apparent de AB pourra alors être exprimé par $\frac{A_1B_1}{F}$, en désignant par F la distance focale du miroir. — Dès lors, le grossissement sera exprimé par le rapport de $\frac{A_2B_2}{f}$ à $\frac{A_1B_1}{F}$ ou, en remarquant que A_2B_2 est égal à A_1B_1,

$$G = \frac{F}{f};$$

c'est-à-dire que le grossissement sera exprimé par le rapport des distances focales principales du miroir et de l'oculaire, résultat analogue à celui que nous avons obtenu pour la lunette astronomique.

587. Télescope de Foucault. — Le télescope de Newton a été perfectionné, dans sa construction, par Foucault. — Les miroirs sphériques de bronze, qu'on employait depuis Newton, offrent cet inconvénient que, s'ils viennent à s'oxyder, il faut recommencer un travail de polissage très long et très dispendieux. A ces miroirs de bronze, Foucault a substitué des miroirs de verre, dont la surface *concave* est couverte d'une couche mince d'argent, déposée chimiquement. — Avant d'effectuer l'argenture, on donne à la surface du verre la forme convenable, par une série d'essais et de retouches permettant d'apprécier les progrès que fait l'opération : cette surface de verre, ainsi travaillée, présente déjà des qualités supérieures à celles des miroirs qu'on avait construits jusque-là. L'opération de l'argenture chimique, en augmentant le pouvoir réflecteur, donne au miroir des qualités plus remarquables encore. — Lorsque la couche d'argent vient à se ternir, on peut l'enlever au moyen d'un liquide qui la dissout, et déposer sur le verre une nouvelle couche d'argent, qui rend au miroir son éclat primitif.

Enfin, dans le télescope de Foucault (*fig.* 403), la lentille oculaire est

remplacée par un véritable microscope composé D, donnant un grossissement beaucoup plus considérable qu'une loupe (*).

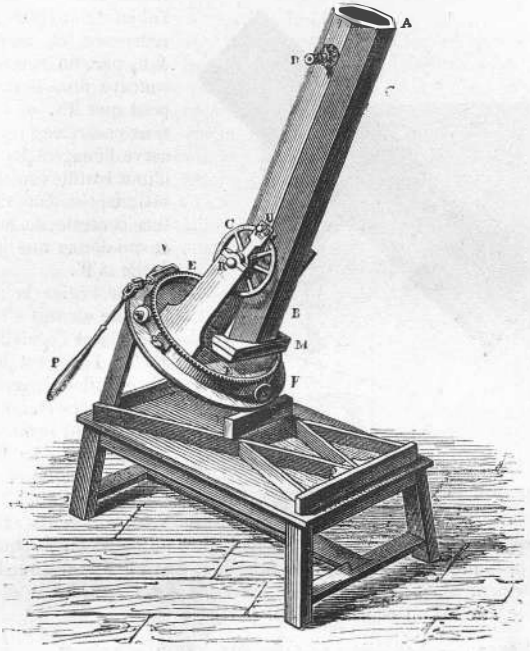


Fig. 403. — Télescope de Foucault.

588. Télescope de Grégory. — Le télescope imaginé par Grégory en

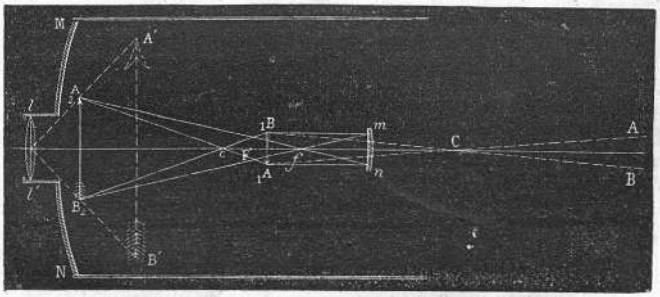


Fig. 404. — Formation des images dans le télescope de Grégory.

1663, une vingtaine d'années avant le télescope de Newton, offre cet avantage qu'il fait voir les objets dans la direction même où ils sont placés par rap-

(*) Le plus grand télescope qu'ait achevé Foucault lui-même est un instrument dont

port à l'observateur, et qu'il donne des images droites. — MN (*fig.* 404) est un miroir concave, qui donne en A_1B_1, un peu au delà de son foyer F, une image réelle et renversée de l'objet AB : cette image est redressée et amplifiée en A_2B_2 par un second miroir concave *mn*, beaucoup plus petit que MN, et tourné en sens contraire ; enfin on observe l'image A_2B_2 au moyen d'une lentille oculaire *ll'*, qui est adaptée dans une ouverture centrale du miroir MN, et qui donne une image virtuelle A'B'.

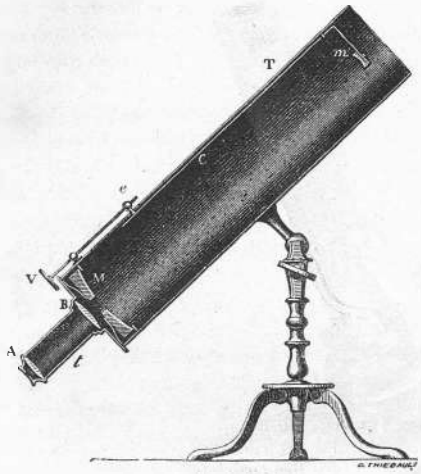


Fig. 405. — Télescope de Grégory.

Pour régler la distance à laquelle on voit A'B', au lieu de déplacer l'oculaire par rapport à l'image A_2B_2, on déplace celle-ci par rapport à l'oculaire, en éloignant ou en rapprochant le miroir *mn* de l'image A_1B_1. La figure 405 montre le mécanisme à l'aide duquel on produit ce mouvement ; la vis extérieure V peut faire mouvoir dans un sens ou dans l'autre un petit écrou *e*, qui traverse une fente pratiquée dans la paroi du tube et se fixe à la tige *c*, laquelle porte le miroir antérieur *m*. — L'oculaire est formé de deux lentilles A et B, fixées dans le tube *t* : c'est un oculaire positif (581).

589. Phares. — Lentilles annulaires, ou à échelons. — Les phares placés sur les côtes sont destinés à produire des signaux lumineux, visibles à une grande distance, pour la sûreté de la navigation en mer.

Or, une source lumineuse émet toujours des rayons *divergents* ; dès lors, si l'on n'employait aucun artifice particulier, il résulte de ce que nous avons vu (466) que, quelle que fût l'intensité propre de la source, l'intensité de la lumière reçue à une distance un peu considérable deviendrait à peu près insensible. — En plaçant un point lumineux au foyer principal d'une lentille convergente, on peut obtenir, à la sortie de la lentille, un faisceau de rayons *parallèles*, la lumière suivant alors une marche inverse de celle qui est indiquée dans la figure 357. L'éclairement produit par un pareil faisceau, sur une surface constante, comme l'œil de l'observateur, deviendra alors *indépendant de la distance.* — Mais, pour que ce parallélisme des rayons émergents soit réalisé, il faut toujours que les faces courbes de la lentille ne comprennent qu'une *petite portion* de la surface sphérique dont elles font partie. Si l'on employait une simple lentille, on ne pourrait donc lui donner qu'une surface peu étendue : par suite, le faisceau réfracté ne contiendrait qu'une petite quantité de lumière.

le miroir a 80 centimètres de diamètre. Il est installé aujourd'hui à l'observatoire de Marseille. — L'observatoire de Paris en possède un autre, qui avait été seulement commencé par Foucault, et dont le miroir a un diamètre de 1m,20. Le tube de cet énorme instrument a plus de 7 mètres de longueur.

Fresnel a imaginé la disposition indiquée par la figure 406. — Une source lumineuse très intense est placée au foyer principal F d'une lentille convergente L : c'est une lentille plan-convexe, dont la face courbe remplit la condition de ne comprendre qu'une petite portion de la surface sphérique dont elle fait partie. Cette lentille est environnée d'une série de lentilles, en forme d'anneaux *aa*, *bb*, *cc*, *dd*..., dont les surfaces convexes ont des courbures différentes, et calculées de façon que le foyer principal de chacune d'elles soit *au même point* F. — Toute la lumière émise par le point F de la source, dans le cône *hFh'*, forme donc, à l'émergence, un faisceau parallèle à l'axe principal du système des lentilles. Les rayons émis par les autres points de la source forment, à l'émergence, des faisceaux parallèles à des axes secondaires qui sont toujours très peu inclinés sur l'axe principal. Le faisceau total est donc très lumineux : il est assez peu divergent pour n'éprouver, à une grande distance, qu'une faible diminution d'intensité ; mais il est cependant assez divergent pour que sa section présente, vers les limites de l'horizon, des dimensions assez considérables.

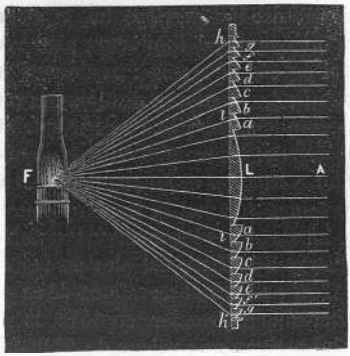


Fig. 406.
Lentilles à échelons, pour les phares.

Les sources de lumière employées ont été d'abord des lampes à huile, à plusieurs mèches, et à flamme très intense. On leur substitue aujourd'hui la lumière électrique, du moins pour les phares les plus importants. — Afin que les navigateurs puissent distinguer les divers phares les uns des autres, on détermine, dans chacun d'eux, des *éclipses* de lumière, d'une durée déterminée. Pour cela, on dispose, autour de la source lumineuse, plusieurs systèmes de lentilles à échelons : la lanterne qui les porte tourne, d'un mouvement uniforme, autour d'un axe vertical. Chaque système de lentilles ne projette alors la lumière, dans une direction déterminée, que pendant un temps assez court : le navigateur, placé dans cette direction, cesse donc d'apercevoir le feu, jusqu'au moment où le système suivant vient prendre la position du premier. — Parfois aussi, on place, devant un ou plusieurs de ces systèmes de lentilles, des verres colorés. — Les colorations et les intervalles d'intermittence des feux sont réglementés, pour chaque phare, et connus des marins.

III. — DÉTERMINATION DE LA VITESSE DE LA LUMIÈRE.

590. Déterminations anciennes de la vitesse de la lumière. — La lumière se propage avec une vitesse considérable. Aussi, est-ce en opérant d'abord sur des distances énormes, comme celles qui nous séparent des astres, qu'on a cherché à mesurer cette vitesse.

On sait, par exemple, que les planètes ne sont pas lumineuses par elles-mêmes : elles ne sont visibles que par la lumière qu'elles reçoivent

du Soleil, et qu'elles nous renvoient. On sait, d'autre part, que certaines planètes, et en particulier la planète Jupiter, sont accompagnées de planètes plus petites, ou *satellites*, qui tournent autour d'elles, pendant qu'elles tournent elles-mêmes autour du Soleil. — Or, pendant le mouvement de Jupiter autour du Soleil, il arrive que, à certaines époques, tel ou tel de ses satellites entre dans le cône d'ombre que Jupiter produit derrière lui, et alors ce satellite *s'éclipse*, c'est-à-dire qu'il cesse d'être lumineux, pour redevenir lumineux à l'instant où il sort du cône d'ombre : ces divers instants peuvent être calculés avec exactitude, au moyen des lois des mouvements des astres. — Mais nous ne commençons pas à voir le satellite à l'instant même où il redevient lumineux : l'intervalle de temps qui s'écoule, entre l'instant où *l'éclipse cesse réellement* et l'instant où *nous voyons l'astre reparaître*, correspond au temps que met la lumière pour parcourir l'espace qui nous sépare de lui. Ce temps lui-même est variable aux diverses époques de l'année, selon que la Terre est plus ou moins éloignée de l'astre.

C'est par des observations de ce genre que l'astronome danois Rœmer détermina le premier, en 1672, la vitesse de propagation de la lumière. Il lui assigna une valeur de 77000 lieues, ou 308000 kilomètres, par seconde. — En admettant ce résultat, la lumière mettrait environ 8 minutes 13 secondes pour franchir la distance du Soleil à la Terre.

Une cinquantaine d'années après, Bradley parvint à un résultat sensiblement égal, par une méthode tout à fait différente, mais fondée toujours sur des observations astronomiques.

591. Expériences modernes. — Méthode de M. Fizeau. — La méthode employée par M. Fizeau a permis de mesurer la vitesse de la lumière en opérant sur des distances de quelques kilomètres seulement.

Les premières expériences de M. Fizeau, publiées en 1849, ont été effectuées entre Montmartre et Suresnes : la distance des deux stations était de 8633 mètres. Voici quelle était la disposition de l'appareil. — A Montmartre était placé un tube de lunette T′ (*fig.* 407), dont l'objectif L′ avait son axe principal dirigé vers la station de Suresnes : au foyer principal *f′* de cet objectif était un petit miroir plan *mn*, qui fermait le tube. D'autre part, à Suresnes était placé un tube semblable T, disposé de manière que l'axe principal de son objectif L fût dans le prolongement de celui de l'autre; soit *f* le foyer principal de cet objectif. A droite du tube T était placée la flamme d'une lampe *a*, au foyer principal d'une lentille *l* qui transmettait les rayons parallèlement à son axe; une seconde lentille *l′* tendait à faire converger les rayons vers son foyer *b*, mais ces rayons rencontraient alors une petite lame de verre inclinée *gg′*, qui les réfléchissait en partie, et amenait les rayons réfléchis à venir converger au point symétrique de *b* par rapport à la surface réfléchissante : la disposition était telle, que ce point de concours fût précisément le foyer principal *f* de la lentille objective L. Après s'être

croisés en ce point *f*, les rayons venaient tomber sur la lentille L, qui les transmettait, parallèlement à son axe, à la lentille L′ de Montmartre : celle-ci les faisait converger en son foyer *f′*, sur le miroir *mn*, en sorte que chacun de ces rayons reprenait, en sens inverse, le chemin qu'avait suivi son symétrique. Les rayons, après avoir traversé l'objectif L, revenaient donc se croiser en *f*, et rencontraient de nouveau la lame de verre *gg′* : celle-ci ne renvoyait qu'une partie de la lumière vers la lampe, et transmettait l'autre partie à l'œil de l'observateur, placé en O. — En résumé, l'observateur placé à Suresnes apercevait ainsi, dans la direction de Montmartre, la lumière de la lampe qui était placée à côté de lui. Mais l'appareil comprenait en outre, à Suresnes, une roue dentée verticale *rr′*, dont le bord correspondait précisément au point *f*. Cette roue étant mise en mouvement par un mécanisme d'horlogerie, la lumière ne pouvait franchir le point *f* qu'aux instants où la roue présentait, en ce point, l'espace *creux* compris entre deux dents : le passage de la lumière était intercepté, aux instants où la roue présentait, en ce même point, le *plein* de l'une de ses dents.

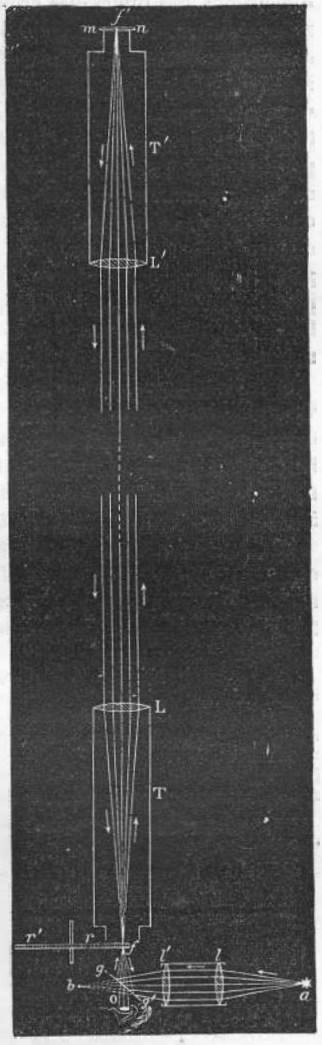


Fig. 407.
Appareil de M. Fizeau, pour la mesure de la vitesse de la lumière.

Il est facile, dès lors, de comprendre la marche de l'expérience. — Supposons que, la roue ayant reçu une certaine vitesse de rotation, un rayon venant de la lampe franchisse le point *f*, au moment où se présente un *creux* de la roue dentée. Si, pendant le temps que met ensuite ce rayon pour se propager de Suresnes à Montmartre et revenir à Suresnes, le *plein* de la dent suivante est venu prendre la place du creux, ce rayon sera intercepté au retour. Il en

sera de même pour tous les autres rayons qui lui succéderont, les dimensions des intervalles creux étant égales à celles des parties pleines. Dès lors, l'œil placé en O ne recevra aucune lumière : il y aura *éclipse* complète. — On n'a donc, en commençant l'expérience, qu'à augmenter progressivement la vitesse de rotation : on observe d'abord un affaiblissement progressif de la lumière; puis, à un moment donné, l'éclipse devient complète. Le mécanisme est disposé de manière qu'il permet de connaître le nombre de tours effectués par la roue en une seconde; comme on connaît d'ailleurs le nombre des dents de la roue, on en déduit la valeur de la fraction de seconde qui représente, pour cette vitesse de rotation, le temps t nécessaire à la substitution d'un *plein*, au *creux* qui le précède. Ce temps est celui que met la lumière pour franchir l'espace e qui sépare les deux stations, aller et retour. Le quotient de e par t représente l'espace parcouru par la lumière en une seconde, c'est-à-dire *la vitesse de la lumière* (*).

592. Résultats. — Les expériences de M. Fizeau ont donné, pour valeur de la vitesse de la lumière, environ 300 000 kilomètres par seconde : c'est un nombre très voisin de celui qui avait été obtenu par Rœmer (590). — De nouvelles expériences, faites par M. A. Cornu au moyen de la même méthode, et avec quelques modifications destinées à en augmenter la précision, ont donné 300 330 kilomètres.

Des expériences toutes différentes, effectuées par Foucault, à l'aide d'un procédé qui permettait d'opérer sur une distance de quelques mètres seulement, avaient fourni, à peu près à la même époque que les expériences de M. Fizeau, un résultat très voisin du sien (**).

(*) Au moment où la roue dentée acquiert une vitesse double de la précédente, les rayons transmis, à l'aller, par les *creux*, viennent rencontrer au retour les *creux suivants*, et la lumière *reparaît*, avec toute son intensité, pour l'œil de l'observateur. — Au moment où la roue acquiert une vitesse triple de la première, il se produit une nouvelle *éclipse*; et ainsi de suite. — Chacune de ces observations permet de calculer la valeur de la vitesse de la lumière, en sorte qu'on peut, en prenant la moyenne des résultats, obtenir finalement cette valeur avec une grande précision.

(**) Voir le principe de la méthode de Foucault, dans les problèmes qui sont à la fin du volume.

CHAPITRE VI

NOTIONS SOMMAIRES SUR LA PHOTOGRAPHIE.

593. Photographie. — Production des images dans la chambre noire. — On désigne sous le nom général de *photographie*, l'art de fixer les images lumineuses sur l'écran qui les reçoit.

Nicéphore Niepce est le premier qui soit parvenu à faire servir la lumière pour obtenir des images persistantes, soit sur le bitume de Judée, soit sur l'iodure d'argent. Daguerre, après s'être associé à ses travaux, découvrit l'influence des vapeurs de mercure pour faire apparaître l'image, encore latente, que produit la lumière lorsqu'elle a frappé l'iodure d'argent pendant quelques secondes : il trouva, en outre, le moyen de fixer cette image. C'est seulement alors que la découverte de Niepce put entrer dans la pratique. — Les procédés ont subi tant de transformations diverses, que nous devons nous contenter de quelques indications générales, suffisantes pour faire concevoir les principes des procédés les plus usités.

L'appareil qui sert à produire l'image est une *chambre noire*, plus ou

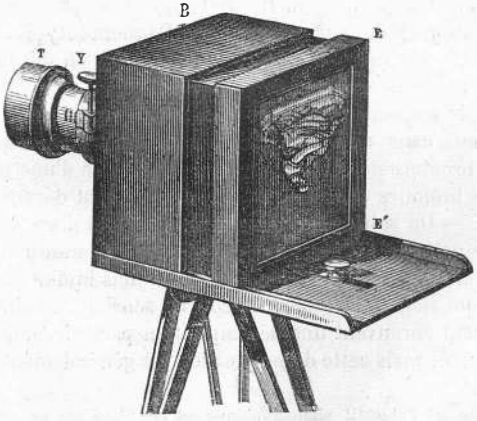


Fig. 408. — Chambre noire pour la photographie.

moins semblable à celle que représente la figure 408 : c'est une caisse

rectangulaire formée de deux parties B, E, qui peuvent glisser l'une dans l'autre. A la face antérieure est fixé le tube T qui porte l'objectif; dans la face postérieure EE′ est enchâssée une glace dépolie, sur laquelle viennent se peindre les images renversées des objets placés en face de l'objectif (530, 1°). Pour amener la glace au foyer conjugué de l'objet par rapport à la lentille, le photographe se place derrière cette glace, et la fait avancer ou reculer jusqu'à ce que l'image paraisse nette; il achève de *mettre au point,* en imprimant, au tube qui porte l'objectif T, de petits déplacements à l'aide de la vis Y.

La marche des rayons lumineux est indiquée dans la figure 409, qui représente la coupe d'une chambre noire : l'objet lumineux AB est

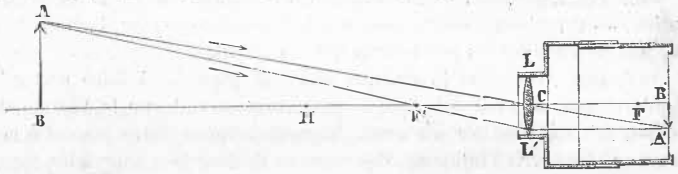


Fig. 409.

placé à une distance supérieure au double de la distance focale principale CH de la lentille LL′ : l'image A′B′ se fait alors entre le foyer F et le point dont la distance à l'objectif serait double de CF (*).

Il est clair qu'un même point de l'image reçoit, toutes choses égales d'ailleurs, une quantité de lumière d'autant plus grande que la lentille offre une plus grande surface : en d'autres termes, l'image A′B′ est d'autant plus vive que le diamètre de l'objectif est plus considérable.

594. Photographie sur plaque, ou Daguerréotypie. — L'image peut être fixée sur une plaque de cuivre argenté, en suivant le procédé qui a conservé le nom de *daguerréotypie.*

Après avoir soigneusement poli la couche d'argent, on la *sensibilise,* en l'exposant, dans un laboratoire obscur, à la vapeur d'iode et à la vapeur du bromure de chaux. La plaque se couvre d'une pellicule d'iodure et de bromure d'argent, substances qui sont décomposables par la lumière. — On substitue alors cette plaque à la glace dépolie EE′ de la chambre noire (*fig.* 408), en ayant soin de la garantir de la lumière pendant le transport. Sous l'influence des rayons lumineux qui forment l'image et qui viennent frapper la couche sensible, l'iodure et le bromure d'argent éprouvent une décomposition partielle, qui met de l'argent en liberté; mais cette décomposition est généralement trop incom-

(*) Généralement l'objectif photographique est constitué par un système de deux lentilles achromatiques : chacune d'elles consiste en un ménisque convergent de crown, combiné avec un ménisque divergent de flint. Le plus souvent, les deux points nodaux de cet objectif composé se confondent avec le centre optique du système.

plète pour laisser une trace appréciable à l'œil : c'est ce qu'on nomme une image *latente*.

On rapporte la plaque dans le laboratoire, et on l'expose à la vapeur de mercure; sur tous les points de la plaque où se trouve de l'argent métallique, la vapeur de mercure se fixe, en gouttelettes imperceptibles, qui produisent une sorte de buée, d'un blanc mat. On voit alors *apparaître* l'image : les clairs s'y détachent en blanc sur les parties ombrées, qui conservent l'aspect miroitant de l'iodure d'argent. — Mais cette image s'effacerait, si on la transportait au jour, parce que l'iodure restant se décomposerait à son tour. Pour *fixer* l'image, on lave la plaque dans une solution d'hyposulfite de soude, qui dissout e bromure et l'iodure d'argent. — Enfin, pour donner à l'image plus de solidité, et en modifier la teinte, on la revêt d'une pellicule d'or métallique, en répandant, sur la plaque légèrement chauffée, une solution de chlorure d'or et d'hyposulfite de sonde. — Il ne reste plus qu'à laver à l'eau distillée, et à sécher.

595. Production des clichés. — A l'époque même où Niepce et Daguerre terminaient leurs recherches, Fox Talbot faisait connaître, en Angleterre, un procédé qui doit être considéré comme l'origine de tous les progrès actuels de la photographie. L'idée fondamentale de ce procédé consiste à préparer d'abord un *cliché*, au moyen duquel on obtiendra ensuite des épreuves de l'image, en nombre aussi grand qu'on voudra. — Le cliché se fait le plus ordinairement *sur verre*, comme nous allons l'indiquer.

Pour les portraits, et en général pour les opérations qui peuvent se faire à proximité du laboratoire, on peut employer le *collodion humide* (solution de coton-poudre dans un mélange d'alcool et d'éther). — Après avoir nettoyé avec soin la plaque de verre, on verse, sur sa surface, du collodion contenant des proportions déterminées de certains bromures et iodures solubles; le liquide, en s'écoulant, laisse sur le verre une mince couche adhérente, qui se prend très vite en une pellicule consistante, en raison de la grande volatilité de l'éther. On plonge ensuite la plaque, pendant quelques minutes, dans une cuvette contenant une solution d'azotate d'argent; cette opération, qui doit être faite à l'abri de la lumière, transforme en iodure et en bromure d'argent les iodures et bromures employés; enfin, on transporte la plaque dans l'appareil, à la place de la glace dépolie EE′ (*fig.* 408). — Lorsqu'elle a reçu l'impression de la lumière, on la reporte dans le laboratoire obscur, et l'on fait *apparaître* l'image, en versant rapidement sur toute la surface de la plaque, soit une solution de sulfate de protoxyde de fer, soit une solution d'acide pyrogallique; ces corps ont la propriété de *continuer la réduction* du bromure et de l'iodure d'argent, aux points qui ont été impressionnés par la lumière. — Enfin, on *fixe* l'image, c'est-à-dire qu'on enlève l'iodure et le bromure d'argent non

altérés, au moyen d'une solution d'hyposulfite de soude; on lave à l'eau pure, et on laisse sécher.

Pour les paysages, et en général pour la reproduction des objets situés loin du laboratoire, on a longtemps employé l'un des nombreux procédés dits *au collodion sec*, qui permettent de préparer les plaques de verre longtemps avant de s'en servir, et de ne développer les images que plusieurs jours après la pose dans la chambre noire. — Depuis quelques années, on substitue généralement à ces procédés les procédés dits aux *gélatino-bromures*, qui ont l'avantage de permettre de diminuer le temps de pose, jusqu'à donner des images presque *instantanées*.

Le cliché constitue une image inverse, ou *négative*, puisque, sur les parties de la plaque qui ont été éclairées, la réduction des sels d'argent a donné naissance à un dépôt noir pulvérulent, tandis que les parties non éclairées ont repris, après le fixage, la transparence du verre. — Il nous reste à indiquer comment ce *cliché négatif* peut servir à tirer des *épreuves positives*.

596. Épreuves positives au sels d'argent. — Le procédé le plus fréquemment employé est celui qu'avait indiqué Talbot, sauf quelques modifications de détail. — Il consiste à exposer à la lumière, derrière le cliché et en contact avec lui, une feuille de papier, *sensibilisée* au chlorure d'argent. Les rayons lumineux, passant à travers les parties transparentes du cliché, noircissent la couche sensible du papier, dans les parties correspondantes : les parties noires du cliché, en arrêtant la lumière, conservent au papier sa blancheur, dans les points qui leur correspondent. On obtient donc sur le papier une image *positive*, et cette opération peut être répétée indéfiniment, puisqu'elle ne fait subir au cliché aucune altération.

Quant aux détails de l'opération, voici, en peu de mots, en quoi ils consistent. — Le papier est d'abord couvert, sur l'une de ses faces, d'une couche d'albumine contenant du chlorure de sodium. Après avoir laissé sécher la feuille, on l'étend, par la même face, sur une solution d'azotate d'argent, qui transforme le chlorure de sodium en chlorure d'argent, et l'on fait sécher. — Pour obtenir une épreuve, on place la feuille de papier, sous le cliché, dans un cadre qui les maintient l'un et l'autre dans une position fixe : on expose ce cadre à la lumière et l'on arrête l'opération lorsque la teinte paraît suffisante. — On enlève du cadre la feuille de papier, on fait *virer* la teinte dans une solution de chlorure d'or, et on la *fixe* à l'hyposulfite de soude, qui dissout les sels non attaqués par la lumière. Enfin, on lave l'épreuve, pendant plusieurs heures, avec de l'eau fréquemment renouvelée.

597. Épreuves au charbon. — Quels que soient les perfectionnements apportés à la préparation des épreuves aux sels d'argent, il paraît à peu près impossible de leur assurer une conservation indéfinie. On doit à M. Poitevin la première réalisation de procédés permettant le tirage des épreuves soit au

charbon, soit aux encres grasses d'imprimerie, qui sont douées d'une inaltérabilité absolue.

Pour le tirage des épreuves dites *au charbon*, on expose à la lumière, derrière le cliché, une feuille de papier couverte d'une couche de gélatine, imprégnée de bichromate de potasse mélangé avec du charbon réduit en poudre impalpable. — La gélatine bichromatée et séche acquiert, sous l'influence de la lumière, la propriété d'être plus ou moins insoluble dans l'eau chaude, selon que l'action des rayons lumineux a été plus ou moins intense. Il suffira donc, aprés une pose de quelques secondes, de plonger la feuille de papier dans un bain d'eau à une température convenable : c'est seulement aux points du papier qui auront été préservés de l'action de la lumiére par les parties noires du cliché, que l'on verra la gélatine se dissoudre, en entraînant avec elle le charbon qui y avait été incorporé (*).

598. Photoglyptie. — Le procédé que nous venons d'indiquer a conduit M. Woodbury, en Angleterre, à une modification remarquable, désignée en France sous le nom de *photoglyptie*, et qui permet de tirer, *à la presse*, un nombre quelconque d'épreuves *au charbon*, sans faire intervenir à chaque fois l'action de la lumière.

Ce procédé est fondé sur cette remarque, que la couche de gélatine bichromatée, qui contient l'image obtenue comme il a été dit, présente, aprés le développement, des *épaisseurs variables* en ses différents points. Or, si l'on prépare, avec toutes les précautions convenables, une feuille de gélatine, isolée de tout support, séchée avec soin, et portant l'image en relief, il suffit de la comprimer fortement, à l'aide d'une presse hydraulique, contre une plaque de plomb (ou d'un alliage de plomb et d'antimoine), pour qu'elle pénètre dans le métal et donne un moule en creux, d'une grande finesse.

Pour tirer une épreuve, on verse, à la surface du moule, de la gélatine intimement mélangée avec du charbon ; on couvre le tout d'une feuille de papier satinée, et l'on comprime légèrement avec une presse ordinaire, pour chasser l'excés de gélatine colorée : la gélatine restante fait prise, et s'attache au papier, avec lequel elle se détache du moule. — On peut ainsi tirer plusieurs centaines d'épreuves dans une journée.

Dans l'un ou l'autre de ces deux procédés, on peut remplacer le charbon par toute autre poudre colorante, et réaliser ainsi les effets de dessins à la sanguine, à la sépia, etc.

599. Tirage des épreuves aux encres grasses. — Photogravure. — La gélatine bichromatée, lorsqu'elle a été exposée à la lumiére sous un cliché, posséde, outre les propriétés que nous avons indiquées, une autre propriété non moins remarquable. Quand on se contente de la mouiller légérement, on constate que l'eau pénétre et gonfle les parties qui ont été préservées de l'action de la lumiére, et qu'elle laisse séches les parties qui ont été éclairées. Si maintenant on passe sur la surface un rouleau chargé d'encre lithographique, ou *encre grasse*, l'encre prend exclusivement sur les parties restées

(*) L'immersion de la feuille dans l'eau a toujours pour premier effet de détacher du papier la pellicule de gélatine : il est donc nécessaire, avant le développement de l'image par l'eau chaude, de plonger l'épreuve dans un bain d'eau froide, où l'on aura disposé à l'avance, soit une autre feuille de papier, soit une lame de verre, sur laquelle on appliquera la feuille impressionnée, par le côté gélatiné, et qui servira de *support* à la pellicule. C'est seulement après cette opération préliminaire, qu'on introduit le tout dans un bain d'eau chaude : on enlève la feuille de papier primitive, et l'on prolonge l'action de l'eau jusqu'à ce que l'on ne voie plus se dégager de l'image aucune parcelle de matière colorante.

sèches. — Une couche de gélatine bichromatée, déposée sur une pierre bien lisse, et soumise aux opérations que nous venons de décrire, présente donc les propriétés d'une véritable surface lithographique, au moyen de laquelle on pourra tirer des épreuves à l'encre grasse, sur papier ordinaire, avec une presse semblable à la presse lithographique.

Enfin, la photographie permet aussi d'obtenir des planches de *cuivre*, pouvant servir au tirage comme les planches gravées en taille-douce. — La première partie de l'opération est absolument semblable à celle de la photoglyptie, c'est-à-dire qu'on prend, sur une lame de plomb, une empreinte de la gélatine bichromatée qui porte l'image en relief. Mais, comme la feuille de plomb n'offrirait pas une dureté suffisante pour résister à l'action de la presse qui doit servir au tirage, on en fait un moulage et un contre-moulage en cuivre, par la galvanoplastie : c'est la planche de cuivre ainsi obtenue qui sert au tirage à l'encre grasse. — On arrive à produire ainsi des gravures dont la finesse dépasse ce que pourrait réaliser l'artiste le plus habile, et qui ont l'avantage de reproduire le modèle avec une fidélité que la main de l'homme ne pourrait atteindre (*).

(*) Dans certains autres procédés de gravure photographique, au lieu d'opérer par moulage, on fait usage de planches métalliques couvertes d'un enduit qui sera impressionné par la lumière, de manière à ne permettre ensuite la morsure aux acides qu'en certains points, à l'exclusion des autres. On obtient ainsi des gravures en creux ou en relief, sur plaque d'acier, de bronze, de cuivre ou de zinc, avec une rapidité et économie supérieures à ce que donnerait la galvanoplastie.

APPENDICE AU LIVRE IV

PROPAGATION DE LA CHALEUR

CHAPITRE PREMIER

CHALEUR RAYONNANTE

I. — PROPAGATION DE LA CHALEUR PAR RAYONNEMENT

600. Rayonnement. — La chaleur peut franchir des espaces plus ou moins considérables, sans échauffer sensiblement les corps qu'elle rencontre. Ce mode de propagation de la chaleur qui offre, avec la propagation de la lumière, les analogies les plus intimes, a reçu le nom de *rayonnement*, ou de *chaleur rayonnante*.

La chaleur qui nous arrive du Soleil, avec sa lumière, ne nous parvient qu'après avoir franchi les espaces célestes, où n'existe aucune matière pondérable : elle a donc traversé *le vide*.

La chaleur émise par des corps qui ne sont pas lumineux traverse également *le vide*. — Pour le démontrer, il suffit de répéter l'expérience suivante, qui est due à Rumford. Un thermomètre *t* (*fig.* 410) est soudé dans la paroi d'un ballon de verre, de manière que son réservoir B soit à peu près au centre du ballon. On a préalablement fait un vide aussi parfait que possible dans le ballon, au moyen d'une machine de Geissler (171), et on l'a ensuite fermé à la lampe. Quand on plonge ce ballon dans une cuve contenant de l'eau chaude (*fig.* 410), on voit le thermomètre accuser *instantanément* une élévation de température.

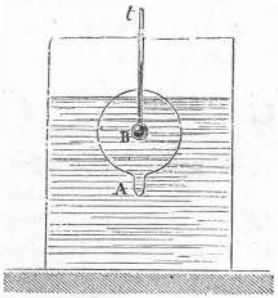


Fig 410.

Enfin, la chaleur traverse certains corps sans les échauffer sensiblement. — Prévost, de Genève, a montré que la chaleur émise par un boulet rouge peut impressionner un thermomètre, placé de l'autre côté d'une nappe d'eau tombant d'un réservoir. — Avec les rayons solaires, rendus convergents

par une lentille de glace, on a pu enflammer de la poudre, du papier, ou d'autres substances combustibles. — Dans ces expériences, il est impossible d'admettre que la chaleur s'est transmise en échauffant d'abord la nappe d'eau, ou la lentille de glace, qui étaient placées sur son trajet : elle les a évidemment traversées sans leur faire éprouver une élévation sensible de température.

601. Propagation rectiligne de la chaleur dans un milieu homogène. — Rayons calorifiques. — Lorsque la chaleur se transmet d'un point à un autre en traversant un milieu homogène, elle se propage comme la lumière, en suivant la *ligne droite* qui joint ces deux points. Un thermomètre étant mis en présence d'une source calorifique de petites dimensions, si l'on interpose un petit écran de carton en un point quelconque de la droite qui joint la source au réservoir du thermomètre, on n'observe plus aucune élévation de température.

Un corps chaud émettant de la chaleur dans *toutes les directions*, toute droite partant d'un point quelconque de ce corps doit être considérée comme représentant la direction d'un *rayon calorifique*.

602. Intensités calorifiques d'une même source à différentes distances. — Lorsque l'on considère des rayons calorifiques émanant d'un même point, on démontre, comme pour la lumière (466), qu'un même élément de surface, placé successivement à diverses distances de la source, reçoit des quantités de chaleur *inversement proportionnelles aux carrés des distances*.

Nous pourrons alors prendre comme mesure de l'*intensité propre* d'une source calorifique, la quantité de chaleur que reçoit de cette source, dans l'unité de temps, un élément de surface, d'étendue déterminée, placé *à l'unité de distance*, normalement aux rayons calorifiques qui lui arrivent. — Soit I l'intensité propre d'une source, ainsi définie. Si ce même élément de surface est placé à une distance D de la source, il recevra, dans le même temps, une quantité de chaleur dont la valeur sera $\frac{I}{D^2}$; cette quantité est ce qu'on nomme l'*intensité de la source à la distance* D.

603. Appareil de Melloni. — Les premières recherches précises sur la chaleur rayonnante ont été effectuées par Leslie, par Rumford et par Delaroche. Ces recherches ont été reprises et étendues par Melloni, à l'aide d'un appareil qui présente le double avantage de reposer sur des principes très simples et de fournir des mesures très précises. — Nous décrirons d'abord les diverses parties de cet appareil.

Les *sources de chaleur* que Melloni employait, pour les diverses expériences, étaient au nombre de quatre, savoir : — 1° Deux sources de *chaleur obscure* : un cube rempli d'eau qu'on maintenait en ébullition au moyen d'une lampe à alcool (*fig.* 411) ; une plaque de cuivre,

chauffée de même par une lampe à alcool (*fig.* 412), et dont la température pouvait atteindre 400 degrés ; — 2° deux sources de *chaleur lumineuse* : une spirale de platine, rendue incandescente par la flamme

Fig. 411.

Fig. 412.

Fig. 413.

Fig. 414.

Sources de chaleur employées par Melloni.

d'une lampe à alcool (*fig.* 413) ; la flamme d'une petite lampe à huile, dite *lampe de Locatelli* (*fig.* 414), à mèche pleine, et sans cheminée de verre.

L'*appareil de mesure*, pour les quantités de chaleur, est un appareil qui a reçu le nom de *thermo-multiplicateur*, et qui joue le rôle d'un thermomètre d'une extrême sensibilité. Une pile thermo-électrique P est installée sur un support, placé sur une règle divisée AB (*fig.* 415) ; d'autres supports servent à placer, sur cette règle, les sources de chaleur

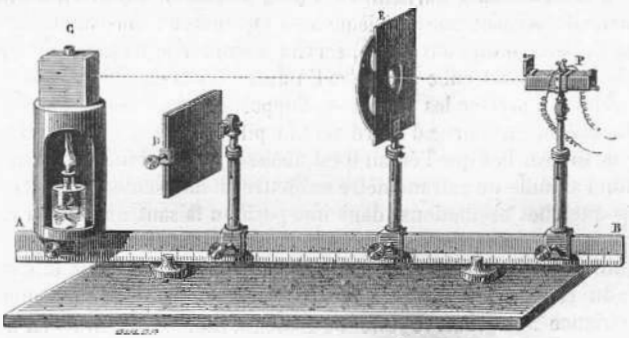


Fig. 415. — Appareil de Melloni.

ou les écrans. Les deux pôles de la pile sont reliés aux bornes d'un galvanomètre, supposé à droite de la figure. — Si l'on fait tomber sur l'une des faces de la pile, celle de gauche par exemple, un faisceau de rayons calorifiques, la température de cette face s'élève proportionnellement à la quantité de chaleur qu'elle reçoit pendant l'unité de temps

on verra plus loin (livre V) qu'il se produit alors un courant électrique, dont l'intensité, mesurée par la déviation de l'aiguille du galvanomètre, est proportionnelle à la différence de température des deux faces de la pile. Dès lors les déviations de l'aiguille du galvanomètre permettront d'évaluer, dans les diverses expériences, les quantités de chaleur qui tomberont sur l'une des faces de la pile (*).

II. — ÉMISSION.

604. Émission de la chaleur rayonnante. — La quantité de chaleur émise par un même corps augmente, en général, quand la *température* de ce corps s'élève. — Ainsi, par exemple, si l'on place la plaque du cuivre chauffée (*fig.* 412) à une certaine distance de la pile de Melloni, en interposant entre elles un écran, on constate que, au moment où l'écran est supprimé, l'aiguille du galvanomètre est d'autant plus déviée que la température de la plaque était plus haute. — Nous n'avons pas d'ailleurs à insister sur ce point : l'expérience de chaque jour nous montre qu'un corps chauffé, comme un tuyau de poêle ou une barre de fer rougie, nous envoie, à distance, d'autant plus de chaleur que ce corps est plus chaud lui-même.

Mais la quantité de chaleur rayonnée par un corps dépend, en outre, de la *nature* de sa surface. C'est ce que montrent les expériences suivantes. — Plaçons, sur la règle AB de l'appareil de Melloni (*fig.* 415), le cube métallique C, dont les faces verticales auront été couvertes chacune d'une substance particulière : l'une, de noir de fumée ; une autre, de blanc de céruse ; une troisième sera métallique et brillante, etc. Un écran E, percé d'une ouverture, servira à limiter le faisceau de rayons qui doit arriver du cube à la pile. Un autre écran D servira, quand il sera relevé, à arrêter les rayons. — Supposons que, l'eau du cube étant en ébullition, on tourne d'abord vers la pile la face qui est enduite de noir de fumée. Dès que l'écran D est abaissé, comme l'indique la figure, on voit l'aiguille du galvanomètre se mettre en mouvement, et s'arrêter, après quelques oscillations, dans une position faisant un certain angle avec sa direction primitive. On relève alors l'écran D et on laisse l'aiguille revenir au zéro. — On tourne ensuite vers la pile une autre face du cube, une face métallique, par exemple, et l'on recommence l'expérience : on observe une nouvelle déviation de l'aiguille, beaucoup moindre que la première. — Avec une troisième face, on trouve encore une déviation différente, et ainsi de suite.

Or dans ces expériences successives, les faces du cube sont toutes à la température de l'eau bouillante : de plus, ce sont toujours des sur-

(*) Lorsque les déviations de l'aiguille dépassent 25 ou 30 degrés, on doit employer, comme le faisait Melloni, une *table de graduation*, construite pour l'appareil lui-même, par une série d'expériences préliminaires.

faces d'égale étendue qui envoient leurs rayons à la pile. Ces expériences montrent donc que, *à égalité de température*, les quantités de chaleur émises dépendent de la nature de la surface rayonnante.

605. Pouvoirs émissifs des divers corps. — En répétant ces expériences pour les divers corps, on trouve que c'est toujours le *noir de fumée* qui, à une même température, émet la plus grande quantité de chaleur. — On est convenu de nommer *pouvoir émissif* d'un corps quelconque, *le rapport de la quantité de chaleur qu'émet ce corps à celle qu'émet le noir de fumée, à la même température.*

Le blanc de céruse paraît être à peu près le seul corps qui, pour la chaleur obscure, émette la même quantité de chaleur que le noir de fumée, à la même température; c'est-à-dire que c'est le seul corps qui ait un pouvoir émissif égal à l'unité. — Pour tous les autres corps, les pouvoirs émissifs sont exprimés par des fractions, que l'on détermine par des expériences semblables à celles que nous venons de décrire. — C'est ainsi qu'ont été obtenus les nombres du tableau suivant :

POUVOIRS ÉMISSIFS POUR LA CHALEUR OBSCURE.

Noir de fumée.	1,00	Platine	0,11
Blanc de céruse.	1,00	Cuivre	0,07
Colle de poisson.	0,91	Or	0,04
Encre de Chine.	0,85	Argent poli.	0,03
Gomme laque.	0,72		

Les métaux ont, en général, comme on le voit, un pouvoir émissif assez faible, et d'autant plus faible que leur surface est mieux polie : le pouvoir émissif de l'argent poli est seulement 0,03. — Ainsi s'explique l'usage que l'on fait de vases d'argent poli, pour conserver les liquides qu'on veut maintenir chauds, comme le thé, le café, etc.

606. Refroidissement. — Loi de Newton. — Le refroidissement d'un corps placé dans une enceinte dont la température est inférieure à la sienne est toujours un phénomène complexe. La rapidité avec laquelle la température du corps s'abaisse dépend, non seulement de sa température primitive et de son pouvoir émissif, mais aussi de la température de l'enceinte, de la nature du gaz qu'elle contient, etc. Cependant, dans la plupart des cas, le refroidissement peut être considéré comme s'effectuant d'après la loi suivante, énoncée par Newton :

Pour un même corps, et lorsque l'excès de sa température sur celle de l'enceinte ne dépasse pas 20 *ou* 30°, *les abaissements de température qui correspondent à des intervalles de temps égaux et très courts sont proportionnels aux excès moyens pendant ces intervalles* (*).

(*) Cette loi conduit à une conséquence très simple, dont la vérification expérimentale peut être considérée comme une vérification de la loi elle-même.

Imaginons qu'un thermomètre ait été chauffé à une température qui surpasse de t degrés celle de l'enceinte où il est placé; et soient t', t'', t'''..., les excès de sa température sur celle de l'enceinte au bout de 1, 2, 3..., minutes. Pendant la première minute, l'abaissement de température est de $t - t'$ degrés, et l'excès moyen

III. — RÉFLEXION, TRANSMISSION ET ABSORPTION.

607. Réflexion de la chaleur. — Lois de la réflexion. — Lorsqu'un rayon calorifique rencontre une surface polie, il éprouve une *réflexion*, semblable à celle de la lumière et assujettie aux mêmes lois (472).

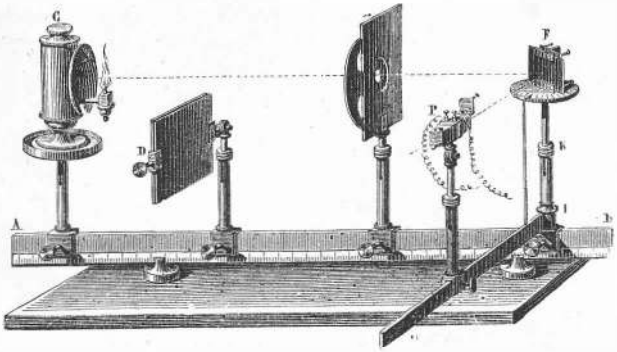


Fig. 416. — Vérification des lois de la réflexion de la chaleur.

Pour le vérifier au moyen de l'appareil de Melloni, on installe verticalement une plaque métallique polie F sur un support (*fig.* 416), à la même hauteur que la source de chaleur C et que l'ouverture de l'écran E.

est $\frac{t+t'}{2}$ degrés; pendant la deuxième minute, l'abaissement est $t' - t''$, et l'excès moyen est $\frac{t'+t''}{2}$; et ainsi de suite. Si la loi de Newton est exacte, il doit y avoir un rapport constant entre les abaissements de température et les excès moyens correspondants, c'est-à-dire qu'on doit avoir, en désignant par k un nombre constant :

$$t - t' = k\,\frac{t+t'}{2},$$

$$t' - t'' = k\,\frac{t'+t''}{2}, \text{ etc.}$$

De la première de ces équations, on déduit

$$t' = \frac{2-k}{2+k}\,t.$$

La seconde donne de même :

$$t'' = \frac{2-k}{2+k}\,t',$$

et ainsi de suite. — Les excès successifs t, t' t'', etc., doivent donc former une suite de nombres tels que chacun d'eux soit égal au précédent multiplié par un facteur constant; en d'autres termes, si la loi de Newton est exacte, *les excès successifs de la température du thermomètre sur celle de l'enceinte, à des instants croissant en progression arithmétique, doivent décroître en progression géométrique.*

L'expérience confirme cette conséquence de la loi, tant que l'excès initial ne dépasse pas 20 ou 30 degrés. Dans ces limites, on doit donc considérer la loi comme exacte.

On place la pile P sur une règle supplémentaire H, mobile autour de la tige K : à la partie supérieure du support est un cercle divisé qui permet de mesurer les angles que fait la normale au miroir avec la règle IA, et avec la règle mobile IH. — Si la règle mobile est placée de manière que ces deux angles soient égaux, l'aiguille du galvanomètre est déviée ; dans toute autre position de la pile, on n'observe pas de déviation sensible. — Cette expérience montre donc que *le rayon réfléchi reste dans le plan d'incidence*, et que *l'angle de réflexion est égal à l'angle d'incidence*.

608. Miroirs ardents. — On obtient une nouvelle vérification de ces lois, en constatant que des rayons calorifiques, réfléchis par une surface courbe, se comportent comme les rayons lumineux.

On a vu (486) que, si l'on reçoit les rayons solaires sur un miroir sphérique concave, parallèlement à son axe, les rayons réfléchis viennent converger en un même point de l'axe, qui est le foyer principal (*fig.* 518). Or, en ce même point, se concentre aussi la chaleur émise sur le miroir par le Soleil ; on y peut enflammer de l'amadou, et, si les dimensions du miroir sont suffisamment grandes, on y peut fondre certains métaux. — Les anciens donnaient à ces miroirs le nom de *miroirs ardents*.

En disposant en regard l'un de l'autre deux miroirs sphériques A et B (*fig.* 417), de manière que leurs axes coïncident, on peut faire, avec

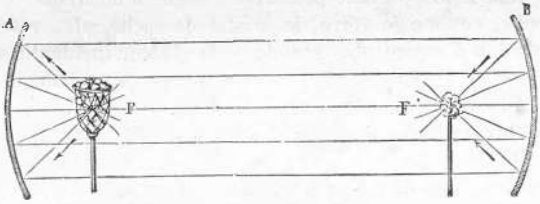


Fig. 417. — Miroirs conjugués.

un foyer de chaleur artificielle, une expérience analogue : c'est l'expérience dite *des miroirs conjugués*. — Au foyer principal F, on place d'abord la flamme d'une bougie : les rayons lumineux qui tombent sur le miroir A sont réfléchis parallèlement à l'axe commun ; ils rencontrent alors le miroir B, et vont, après réflexion, converger au foyer principal F′ ; si, en ce point, on les reçoit sur un petit écran blanc, on obtient une image brillante. Si l'on remplace l'écran par la boule d'un thermomètre sensible, on constate immédiatement une élévation de température.

Dans les Cours, on rend l'expérience plus frappante, en plaçant en F une corbeille métallique, remplie de charbons ardents ; en F′, de l'amadou ou du coton-poudre. On masque l'un des miroirs par un

écran, pendant qu'on dispose les charbons; à l'instant où l'on enlève l'écran, l'amadou prend feu, même à plusieurs mètres de distance.

609. Pouvoirs réflecteurs des divers corps. — Quelque polie que soit une surface, elle ne réfléchit jamais toute la chaleur qu'elle reçoit. — On appelle *pouvoir réflecteur* d'une surface, *le rapport de la quantité de chaleur réfléchie à la quantité de chaleur incidente.*

L'appareil de Melloni permet de mesurer les pouvoirs réflecteurs de plaques polies de différentes natures, en plaçant successivement en F (*fig.* 416) ces diverses plaques. On mesure d'abord la quantité de chaleur incidente, en plaçant la pile sur le trajet des rayons qui viennent directement de la source; puis la quantité de chaleur réfléchie, en procédant comme nous l'avons indiqué (607). — C'est ainsi que MM. de la Provostaye et P. Desains ont obtenu les résultats suivants, pour la chaleur d'une lampe de Locatelli :

POUVOIRS RÉFLECTEURS.

Argent	0,97	Acier	0,83
Or	0,96	Zinc	0,81
Cuivre	0,93	Platine	0,80
Laiton	0,93	Fer	0,77
Métal des miroirs	0,86		

On peut étudier aussi, pour une même surface, les quantités de chaleur réfléchies *sous diverses incidences.* — Pour les corps *opaques*, les pouvoirs réflecteurs varient peu avec l'angle d'incidence. Les corps *transparents*, comme le verre, le cristal de roche, etc., réfléchissent une proportion d'autant plus grande de la chaleur incidente, que l'angle d'incidence est plus grand. — Ces résultats sont analogues à ceux que présente la réflexion de la lumière (479).

610. Réflexion irrégulière ou diffusion. — Les substances mates, telles que le blanc de céruse, les métaux dépolis, lorsqu'ils reçoivent de la chaleur dans une direction déterminée, ne la réfléchissent pas dans une direction unique : ils en renvoient une partie dans toutes les directions. Ce résultat, qui est encore analogue à celui que nous avons constaté pour la lumière (480), constitue la *réflexion irrégulière* ou la *diffusion* de la chaleur. — Ainsi, en plaçant en F (*fig.* 416) une plaque couverte de blanc de céruse, et en donnant successivement à la règle H diverses directions, on constate que la pile accuse toujours une certaine quantité de chaleur diffusée.

611. Transmission de la chaleur rayonnante. — Corps diathermanes et corps athermanes. — Nous avons constaté (600) que la chaleur peut traverser certains corps, comme la lumière traverse les corps transparents. — On désigne ces corps sous le nom de *corps diathermanes*, c'est-à-dire transparents pour la chaleur. Par opposition, on appelle *corps athermanes*, ceux qui arrêtent complètement la chaleur incidente, c'est-à-dire qui sont opaques pour la chaleur.

Les rayons calorifiques, lorsqu'ils passent d'un milieu dans un autre, éprouvent une *réfraction* qui est soumise aux mêmes lois que celle de la lumière (502). Ainsi, en recevant les rayons du soleil sur une lentille convergente, on obtient, au foyer principal, une concentration de chaleur qui permet d'y allumer de l'amadou, du drap, etc.

612. Décomposition de la chaleur par un prisme. — Radiations lumineuses et radiations obscures. — Quand on répète, avec un prisme de *sel gemme*, l'expérience de la décomposition de la lumière solaire (537), et qu'on emploie une pile thermo-électrique étroite pour explorer les diverses parties du faisceau dispersé, on constate que la pile accuse des quantités de chaleur croissantes, depuis le violet U (*fig.* 418) jusqu'au rouge R. En outre, la pile accuse encore des quan-

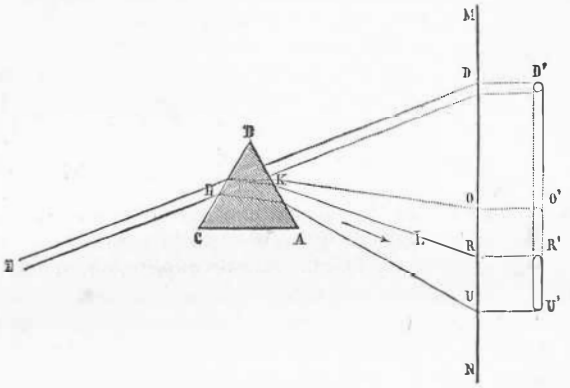


Fig. 418. — Décomposition de la chaleur par un prisme.

tités sensibles de chaleur au delà du rouge, dans une étendue RO qui est à peu près égale à UR. Les radiations émises par le soleil comprennent donc, non seulement des rayons qui sont *à la fois calorifiques et lumineux*, mais aussi des rayons *de chaleur obscure*, moins déviés par le prisme que les premiers (*).

La même expérience, répétée avec une autre source *lumineuse*, comme la lampe de Locatelli (*fig.* 414) ou la spirale incandescente (*fig.* 413), fournit encore un spectre dans lequel on trouve des rayons de chaleur obscure, et des rayons qui sont à la fois calorifiques et lumineux : ces derniers sont seulement en proportion moindre que dans la lumière solaire. — Enfin, les sources *obscures*, comme la plaque chauffée (*fig.* 412), ou le cube d'eau bouillante (*fig.* 411), ne donnent

(*) Un prisme de verre donnerait aussi un spectre calorifique, mais moins étendu au delà du rouge que le spectre fourni par le prisme de sel gemme. Nous verrons, en effet, que le verre absorbe la plus grande partie des rayons de chaleur *obscure*, et ne laisse guère passer que les rayons de chaleur *lumineuse*.

plus de spectre lumineux, mais uniquement des rayons de chaleur obscure, moins déviés que ne seraient des rayons rouges.

Il résulte, de l'ensemble de ces expériences, que les rayons *calorifiques obscurs* ne présentent, par rapport aux rayons *calorifiques lumineux*, que des différences du même ordre que celles qui distinguent entre eux les rayons lumineux de diverses couleurs. Ces rayons de chaleur se séparent, sous l'action d'un prisme, comme se séparent les rayons des diverses couleurs, en vertu de leurs différences de réfrangibilité. — Nous allons retrouver les mêmes analogies dans la *transmission* des rayons calorifiques au travers de substances de natures diverses.

613. Pouvoirs diathermanes des diverses substances, pour les diverses espèces de rayons calorifiques. — Pour étudier le degré de transparence des diverses substances pour la chaleur, ou leur *diathermanéité*, on les façonne en petites plaques, que l'on place sur un support (*fig.* 419), entre la source de chaleur et la pile thermo-électrique : la déviation de l'aiguille du galvanomètre fait connaître la quantité de chaleur transmise. On enlève ensuite la plaque, et on laisse arriver directement le faisceau calorifique sur la pile : on obtient une autre déviation, qui fait connaître la quantité de chaleur incidente.

Fig. 419.
Plaques pour l'étude des pouvoirs diathermanes.

On appelle *pouvoir diathermane* d'une plaque, *pour un faisceau calorifique de nature déterminée, le rapport entre la quantité de chaleur transmise et la quantité de chaleur incidente.*

L'expérience montre que le pouvoir diathermane d'une même substance peut présenter des valeurs très diverses, selon la *nature* de la chaleur incidente. — En voici quelques exemples :

1° Si l'on opère avec des sources de chaleur obscure, comme le cube à eau bouillante ou la plaque de cuivre chauffée, les plaques de verre ou de cristal de roche ne laissent passer que des quantités de chaleur inappréciables. — Ces substances n'ont donc, pour les rayons *calorifiques obscurs*, qu'un pouvoir diathermane *sensiblement nul.*

2° Au contraire, si l'on opère avec des sources de *chaleur lumineuse*, comme la lampe de Locatelli ou la spirale incandescente, la quantité de chaleur transmise au travers de ces mêmes plaques est une fraction très notable de la quantité de chaleur incidente. — Ce résultat, comparé au précédent, montre que ces substances (verre ou cristal de roche) n'arrêtent, dans les faisceaux émis par ces sources, que les rayons de chaleur obscure; elles laissent passer, avec la lumière, une portion considérable de rayons *calorifiques lumineux.* On a même constaté directement qu'elles ont, pour ces rayons pris isolément, un pouvoir diathermane voisin de l'unité.

3° Enfin, d'autres substances, comme le sel gemme, laissent toujours passer la presque totalité de la chaleur incidente, *quelle que soit la source de chaleur* employée. — Le sel gemme a donc un pouvoir diathermane sensiblement égal à l'unité, pour les rayons *calorifiques de toutes natures*.

Ces résultats offrent une analogie remarquable avec ceux que présente la transmission de la lumière au travers des divers corps. — Ainsi, le verre ou le cristal de roche, recevant le faisceau de chaleur complexe qu'émet la lampe de Locatelli, ne laissent passer que les divers rayons de chaleur lumineuse et arrêtent les rayons de chaleur obscure; absolument comme une vitre rouge, recevant la lumière blanche du soleil, ne laisse passer que les rayons rouges et arrête les rayons des autres couleurs. — Le sel gemme laisse passer aussi bien les rayons obscurs que les rayons lumineux, comme une vitre incolore laisse passer indifféremment les rayons des diverses couleurs qui constituent la lumière blanche.

En résumé, le pouvoir diathermane de chaque substance dépend de la nature du faisceau calorifique qu'elle reçoit, comme le degré de transparence d'une substance, pour la lumière, dépend de la composition de la lumière incidente.

614. Applications. — Dans les serres vitrées, où l'on conserve les plantes auxquelles l'action du froid serait funeste, l'observation montre que, même pendant l'hiver, la température s'élève rapidement, sous la simple influence des rayons solaires. — Ce résultat s'explique facilement, d'après ce qui précède. La plus grande partie de la chaleur du soleil pénètre, avec la lumière, au travers des vitres, et échauffe les corps que la serre contient. Ceux-ci, à mesure que leur température s'élève, émettent à leur tour des quantités de chaleur croissantes; mais c'est de la chaleur *obscure*, qui ne peut traverser le verre, en sorte que la chaleur s'accumule progressivement à l'intérieur de la serre. — Il en est de même dans les cloches dont les maraîchers couvrent leurs plantes pour faire mûrir les fruits : il suffit d'introduire la main sous ces cloches, pour constater l'élévation de température qui s'y produit dès qu'elles ont été frappées quelque temps par le soleil.

L'eau jouit, sous ce rapport, de propriétés analogues à celles du verre. De là, l'élévation de température qu'éprouve la vase, au fond des étangs peu profonds, sous l'action des rayons solaires (*).

615. Absorption de la chaleur. — Pouvoirs absorbants des divers corps. — La chaleur *absorbée* par un corps est la portion de chaleur incidente qui est retenue par lui, et qui sert, en général, à lui faire

(*) La vapeur d'eau dont se charge notre atmosphère jouit également de propriétés semblables, comme l'ont montré les expériences de Tyndall. L'atmosphère humide a donc pour effet de ralentir le refroidissement de notre globe : elle laisse passer, en quantité notable, la chaleur lumineuse émise par le Soleil, et arrête, en très grande partie, la chaleur obscure que la Terre échauffée émet en sens contraire.

éprouver une élévation de température. — On appelle *pouvoir absorbant* d'un corps, pour une chaleur de nature déterminée, *le rapport de la quantité de chaleur absorbée à la quantité de chaleur incidente.*

L'expérience montre que le *noir de fumée*, lorsqu'il reçoit un faisceau de chaleur de nature quelconque, n'en renvoie aucune partie par réflexion régulière, et n'en diffuse qu'une fraction insignifiante. — Le noir de fumée doit donc être considéré comme ayant *un pouvoir absorbant sensiblement égal à l'unité.*

Quant aux autres corps, si l'on considère en particulier les métaux, qui sont complètement *athermanes* et qui peuvent acquérir un poli assez parfait pour ne donner lieu qu'à la réflexion régulière, sans diffusion sensible, leur pouvoir absorbant peut se déduire de leur pouvoir réflecteur. — En effet, si l'on mesure le pouvoir réflecteur r d'un métal parfaitement poli (609), c'est-à-dire la fraction qui exprime le rapport de la quantité de chaleur réfléchie à la quantité de chaleur incidente, le pouvoir absorbant a sera représenté par la fraction complémentaire; c'est-à-dire qu'on aura

$$a = 1 - r.$$

Le cas que nous venons de considérer est le plus simple : c'est le seul où les pouvoirs absorbants soient connus avec précision.

616. Égalité du pouvoir absorbant et du pouvoir émissif, pour un même corps et une même espèce de chaleur. — Nous venons de voir que, pour toute espèce de chaleur, le pouvoir *absorbant* du noir de fumée est égal à l'unité. D'après la définition même des pouvoir émissifs (605), le pouvoir *émissif* du noir de fumée est également représenté par l'unité.

D'autre part, nous venons de voir (615) que, pour des corps athermanes ayant un pouvoir diffusif négligeable, on peut déterminer le pouvoir absorbant, au moyen du pouvoir réflecteur. — Or, si l'on compare les pouvoirs absorbants ainsi obtenus, avec les pouvoirs émissifs des mêmes corps rapportés à celui du noir de fumée (605), on trouve deux séries de nombres *identiques*, au moins tant qu'il s'agit de rayons calorifiques de même nature.

Enfin, pour les substances qui ont un pouvoir diffusif, et dont les pouvoirs absorbants n'ont pu être déterminés avec la même exactitude, on constate que toutes les circonstances qui font varier le pouvoir émissif modifient aussi, et dans le même sens, le pouvoir absorbant.

D'après l'ensemble de ces résultats, on est conduit à admettre que *le pouvoir émissif d'un corps est toujours égal à son pouvoir absorbant*, pour la même espèce de chaleur. — Ce principe, dont la théorie démontre la généralité, permet de se dispenser de la détermination directe des pouvoirs absorbants de certaines substances, quand on connaît leurs pouvoirs émissifs pour la même espèce de chaleur.

617. Hypothèse de l'équilibre mobile de température. — Quand on met en présence divers corps, à des températures différentes, les plus froids s'échauffent, les plus chauds se refroidissent, et cela jusqu'au moment où ils arrivent tous à une même température.

Ce résultat pourrait s'expliquer en admettant que, dans un pareil système, les corps les plus chauds sont les seuls qui rayonnent de la chaleur, et que ce rayonnement cesse dès que leur température est devenue égale à celle que les autres corps ont acquise. — Pour chaque corps, la propriété d'émettre de la chaleur serait alors subordonnée à la température des corps environnants.

Il est plus rationnel d'admettre que tous les corps *rayonnent toujours de la chaleur*, mais que, pour chacun d'eux, la quantité de chaleur émise est d'autant plus grande que leur température est plus élevée. — Dès lors, plusieurs corps étant mis en présence, si l'un d'eux se refroidit, c'est *qu'il émet plus de chaleur qu'il n'en absorbe* ; si un autre s'échauffe, c'est *qu'il absorbe plus de chaleur qu'il n'en émet.* — L'équilibre de température, une fois réalisé, se conserve, parce que, pour chacun des corps, la perte de chaleur due à son rayonnement propre est *compensée* par la chaleur qu'il absorbe. — C'est ce qu'on a appelé *l'équilibre mobile de température.*

618. Explication de la réflexion apparente du froid. — Cette manière d'envisager les phénomènes fournit une explication de l'expérience connue sous le nom de *réflexion apparente du froid.*

Reprenons les miroirs conjugués déjà décrits (608) ; plaçons au foyer F' du miroir A'B' (*fig.* 420) le réservoir d'un thermomètre sensible

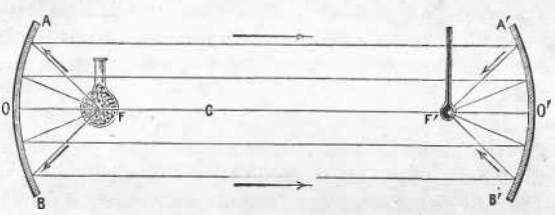


Fig. 420. — Miroirs conjugués, pour la réflexion apparente du froid.

puis fixons au foyer F du miroir AB un ballon contenant de la glace. Le thermomètre indiquera un abaissement de température. — Cette expérience, célèbre dans l'histoire de la science, semblait conduire à admettre l'existence de *rayons frigorifiques.* La théorie de l'équilibre mobile de température dispense de cette hypothèse.

En effet, supposons d'abord que le ballon *ne soit pas encore placé,* et que l'équilibre de température existe ; admettons, pour plus de simplicité dans l'explication, que les parois de l'enceinte et la surface du thermomètre soient *dépourvues de pouvoir réflecteur*, et qu'elles aient

des *pouvoirs émissifs égaux*. Le thermomètre F′ envoie sur le miroir A′B′ des rayons divergents qui sont réfléchis par ce miroir, puis par le miroir AB, vont passer par le point F, et parviennent ensuite à divers points de l'enceinte. Dans les mêmes directions, et en sens inverse, se propagent des rayons venant de l'enceinte, passant par F, et renvoyés par les miroirs vers le point F′. Puisque l'enceinte et le thermomètre ont même pouvoir émissif, et par suite même pouvoir absorbant, la perte de chaleur reste, pour le thermomètre, toujours égale au gain, et sa température reste invariable. — Au contraire, quand on vient à placer en F le ballon plein de glace, les rayons qui venaient de l'enceinte en passant par F, et qui étaient ainsi renvoyés par les miroirs sur le thermomètre F′, sont remplacés par les rayons moins intenses qu'émet le ballon. Le thermomètre reçoit donc moins de chaleur que précédemment, c'est-à-dire moins de chaleur qu'il n'en perd : il doit donc éprouver un abaissement de température, comme le montre l'expérience.

619. Identité de la chaleur et de la lumière. — Il résulte de tout ce qui précède que la propagation de la chaleur se rapproche, en tous points, de la propagation de la lumière.

Pour la chaleur et pour la lumière, les lois de la réflexion sont identiques (607 et 608). — La décomposition d'un faisceau de rayons solaires par un prisme de sel gemme (612) montre que les rayons *calorifiques obscurs* se séparent des rayons lumineux, à cause de leur moindre réfrangibilité, comme les rayons rouges se séparent des rayons violets. — Dans les rayons *calorifiques lumineux*, les propriétés calorifiques sont inséparables des propriétés lumineuses. — Enfin, l'étude de la transmission de la chaleur (615) montre que les rayons obscurs peuvent être transmis par certaines substances transparentes, et absorbés par d'autres.

L'ensemble des phénomènes conduit donc à admettre que la chaleur et la lumière sont dues à une seule et même cause. — Cette hypothèse n'est point infirmée par l'existence de rayons de chaleur sans lumière, car il est permis de supposer que l'organe de la vue, s'il était constitué d'une manière différente, pourrait être impressionné par ces rayons, comme il l'est par les rayons lumineux (*).

(*) Les liquides qui remplissent le globe de l'œil, et que les rayons doivent traverser avant de tomber sur la rétine, sont *diathermanes pour les rayons lumineux*, mais *athermanes pour les rayons obscurs* : c'est ce que l'expérience permet de constater directement, en opérant sur les liquides d'un œil de bœuf. Il en résulte que, en réalité, les rayons calorifiques obscurs n'arrivent pas à la rétine.

CHAPITRE II

CONDUCTIBILITÉ

620. Propagation de la chaleur par conductibilité. — Les observations journalières suffisent pour montrer que la chaleur peut se transmettre dans les corps solides par *conductibilité*, c'est-à-dire par une élévation graduelle de la température de leurs couches successives. — La méthode suivante permet de comparer entre eux les différents corps solides, au point de vue de leurs propriétés *conductrices*.

621. Conductibilité des corps solides. — Appareil d'Ingenhousz. — L'appareil d'Ingenhousz se compose d'une petite cuve rectangulaire de laiton (*fig.* 421), dans la paroi de laquelle sont assujetties des tiges de diverses substances : argent, cuivre, laiton, zinc, étain, verre, bois, etc. Ces tiges ont été couvertes d'une couche mince de cire (pourcela, on les a plongées dans un bain de cire fondue, et on les a laissées refroidir après les en avoir retirées). — On verse de l'eau bouillante dans la caisse; la chaleur se transmet dans la longueur des tiges, et l'on juge de leur plus ou moins grande conductibilité par la distance à laquelle se propage la fusion de la cire. — On constate ainsi, par exemple, que la cire fond jusqu'à l'extrémité de la tige d'argent, tandis que la fusion se propage à peine sur une longueur de quelques millimètres sur la tige de bois.

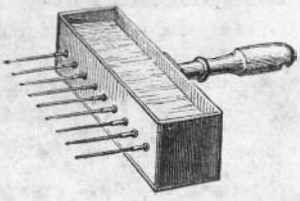


Fig. 421. — Appareil d'Ingenhousz.

Les corps solides les plus usuels peuvent être classés comme il suit, par ordre de conductibilité décroissante :

Argent, Cuivre; Or, Laiton, Zinc, Étain, Fer, Acier, Plomb, Platine, Bismuth;

Verre, Marbre, Porcelaine, Charbon, Bois.

Les métaux sont donc les corps qui conduisent le mieux la chaleur. — Au contraire, le verre, le marbre, la porcelaine, sont des corps *mauvais conducteurs*. — De tous les corps solides, c'est le bois qui présente la plus faible conductibilité. C'est pour cette raison qu'on adapte des manches de bois aux outils de fer qui doivent être intro-

duits dans le feu ; des anses de bois, aux théières ou aux casseroles d'argent, etc.

622. Coefficients de conductibilité. — Pour comparer, d'une manière précise, les propriétés conductrices des divers corps, on a été conduit à la considération d'une quantité numérique, caractéristique de chaque corps, et qu'on appelle *coefficient de conductibilité*.

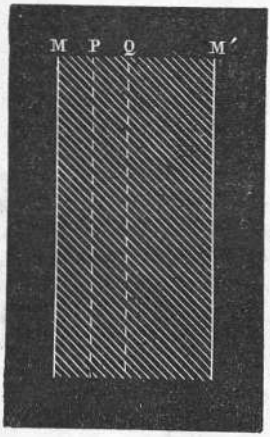


Fig. 422.

Pour définir cette expression, considérons une masse homogène indéfinie, limitée par deux plans parallèles M, M' (*fig.* 422), et constituant une sorte de mur, dont les deux faces seront maintenues *à des températures constantes* T et T'. Au bout d'un certain temps, les points intérieurs arriveront chacun à une température déterminée, qu'ils conserveront ensuite indéfiniment. — Or, il est facile de voir que, *une fois l'équilibre de la température établi*, tous les plans parallèles aux faces du mur doivent laisser passer, dans un temps donné, par l'unité de surface, *des quantités égales de chaleur*. En effet, supposons que la chaleur se propage de gauche à droite, et considérons deux plans quelconques P, Q, parallèles aux faces : si l'unité de surface du plan P laissait passer, dans un même temps, une quantité de chaleur plus grande que l'unité de surface du plan Q, il y aurait accumulation de chaleur entre ces deux plans, et la température des points compris entre eux devrait aller en s'élevant. — Cela posé, on appelle *coefficient de conductibilité absolue* d'une substance, la quantité de chaleur qui traverse, en une seconde, l'unité de surface d'un plan quelconque, parallèle aux faces d'un mur formé de cette substance, ce mur ayant *pour épaisseur l'unité* et présentant, entre ses faces extrêmes, *une différence de température de 1 degré*.

Soit c le coefficient de conductibilité absolue d'une substance ; si le mur a pour épaisseur l et si ses deux faces sont à des températures T et T', une surface S, prise dans un plan parallèle aux faces du mur, laissera passer, en une seconde, une quantité de chaleur $q = \frac{cS(T-T')}{l} = \frac{cSV}{l}$, en désignant par V la différence des températures des deux faces. — L'identité de cette formule et de celle que nous obtiendrons comme traduction des lois d'Ohm (livre V, chap. IV), fait ressortir l'analogie qui existe entre la propagation de l'électricité et la propagation de la chaleur.

Les conditions dans lesquelles nous nous sommes placés, pour définir les coefficients de conductibilité absolue, sont difficilement réalisables ; aussi les valeurs absolues de ces coefficients ne sont-elles pas connues avec précision. — Mais les expériences de Despretz, et surtout celles de MM. Wiedemann et Franz, ont fait connaître avec une grande exactitude *les rapports* que présentent entre eux les coefficients de conductibilité des divers métaux. — Le tableau suivant donne les coefficients de conductibilité des principaux métaux, en représentant conventionnellement par 100 celui de l'argent, qui est le métal le plus conducteur.

COEFFICIENTS DE CONDUCTIBILITÉ DES MÉTAUX.

Argent	100,0	Fer	11,9
Cuivre	77,6	Acier	11,1
Or	53,2	Plomb	8,5
Laiton	23,6	Platine	8,4
Zinc	19,0	Palladium	6,3
Étain	14,4	Bismuth	1,8

Il est à remarquer que, dans ce tableau, les métaux sont rangés à peu près dans le même ordre que celui de leurs résistances spécifiques électriques croissantes (livre V, chap. IV), c'est-à-dire dans l'ordre de leurs conductibilités électriques décroissantes.

623. Courants produits dans les liquides ou dans les gaz, chauffés par leur partie inférieure. — Convection. — Lorsqu'on chauffe un liquide par la partie inférieure, comme on le fait d'ordinaire, les couches qui reçoivent directement l'action de la chaleur se dilatent : par suite, leur densité diminuant, elles s'élèvent ; elles sont remplacées par d'autres, qui s'échauffent à leur tour, et ainsi de suite. Il s'établit ainsi des courants ascendants de liquide chaud, et des courants descendants de liquide froid. — On peut rendre ces courants visibles par une expérience simple. Une cloche de verre renversée (*fig.* 423) contient de l'eau, dans laquelle on a mis en suspension un peu de sciure de bois : en chauffant cette cloche par sa paroi inférieure, on voit les parcelles de bois, entraînées par les mouvements de l'eau, s'élever du point chauffé vers la surface, et redescendre ensuite en longeant les parois du vase. — Ce déplacement continuel des diverses parties du liquide, qui a pour effet de répartir à peu près uniformément la chaleur dans toute sa masse, a été désigné sous le nom de *convection*.

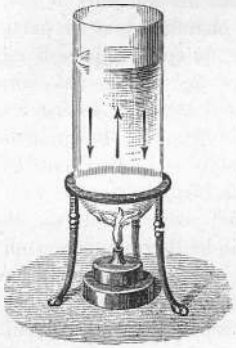


Fig. 423. — Courants produits dans un liquide chauffé

Les gaz étant plus dilatables et plus mobiles que les liquides, les mouvements de ce genre s'y manifestent plus facilement encore. — C'est ainsi que l'air échauffé au contact des parois d'un poêle s'élève vers la partie supérieure de la pièce ; il est remplacé par de l'air plus froid, qui s'échauffe et s'élève à son tour, et ainsi de suite. — On peut rendre sensible ce mouvement ascendant de l'air, en adaptant au tuyau du

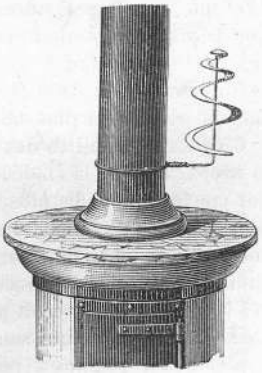


Fig. 424.
Mouvement ascendant de l'air chaud.

poêle un fil métallique recourbé (*fig.* 424), sur l'extrémité duquel on place une bande de papier découpée en spirale, de manière qu'elle forme une sorte d'hélice enroulée autour du fil. L'air qui s'élève autour du tuyau, en rencontrant l'hélice, lui communique un mouvement de rotation continu.

De même, quand la surface de la Terre est chauffée par le soleil, les couches d'air voisines du sol s'élèvent à mesure qu'elles s'échauffent; elles sont remplacées par de l'air froid, qui afflue des régions voisines, et qui se comporte ensuite de la même manière. — C'est l'une des causes qui produisent les *vents*, à la surface de la Terre.

624. Conductibilité des liquides. — D'après ce que l'on vient de voir, pour juger si les liquides sont conducteurs de la chaleur, il faut faire en sorte qu'il ne puisse pas s'y produire de mouvements de convection. — C'est à quoi l'on parvient en les chauffant par la partie supérieure. La conductibilité est tellement faible, qu'on peut faire bouillir, *à la surface*, de l'eau placée dans un tube de verre, sans faire éprouver une élévation de température sensible à la partie inférieure.

Une expérience due à Murray montre cependant que la chaleur peut se propager par conductibilité à travers un liquide. — Un thermomètre fut placé au fond d'une cavité creusée dans un bloc de glace et remplie d'huile; on mit un corps chaud en contact avec la surface du liquide, et au bout de quelques minutes on vit le thermomètre indiquer un petit accroissement de température. — On ne pouvait pas admettre que la chaleur se fût transmise par les parois du vase; car, la glace étant à 0°, la chaleur qu'elle eût absorbée n'aurait eu pour effet que d'en faire fondre une partie. — D'autre part, pour prouver que la propagation de la chaleur n'était pas uniquement due au rayonnement, on répétait l'expérience en présentant le corps chaud à une petite distance de la surface : l'effet produit sur le thermomètre était incomparablement plus faible.

625. Conductibilité des gaz. — D'après ce que nous avons vu (623), la propagation de la chaleur dans les gaz doit se faire, le plus souvent, par convection. — De plus, les gaz étant très diathermanes, il est toujours difficile de constater directement les effets de leur conductibilité, même en les chauffant par la partie supérieure : ce qui détermine les indications d'un thermomètre placé à la partie inférieure, c'est bien plutôt la chaleur qu'il reçoit par rayonnement, que l'élévation de température des couches qui sont en contact avec lui.

Cependant Magnus a réussi à constater que l'*hydrogène* est conducteur. — Un cylindre plein de gaz hydrogène étant chauffé par la partie supérieure, un thermomètre placé à la partie inférieure s'échauffe d'autant plus rapidement que la pression du gaz est plus grande; il est clair que ces variations, dans l'effet produit, ne peuvent être attribuées qu'à des variations dans la conductibilité.

626. Applications usuelles de la conductibilité. — Lorsque, par un temps froid, nous appliquons la main sur un morceau de fer, puis sur un morceau de bois, le fer nous paraît *plus froid* que le bois. Ils étaient cependant l'un et l'autre à la température de l'air extérieur. Mais, le fer étant conducteur, la petite quantité de chaleur qui lui a été communiquée par notre main s'est répandue dans sa masse, en sorte qu'elle n'a pas pu l'échauffer d'une manière sensible. Au contraire, le bois étant mauvais conducteur, la chaleur transmise par la main est restée dans les points que nous avons touchés, et leur a fait prendre une température plus élevée.

Voici une expérience qui montre, d'une manière frappante, des effets du même genre. — On prend une boule de cuivre, et on l'enveloppe d'une couche de mousseline, serrée sur sa surface. On applique sur cette boule un charbon rouge : l'étoffe ne brûle pas, parce que la chaleur transmise par le charbon se répand dans toute la masse du cuivre, et la température ne peut s'élever que très lentement — Au contraire, si l'on fait la même expérience avec une boule de bois, enveloppée de mousseline, l'étoffe est brûlée, parce que la chaleur transmise aux points touchés ne se propage que difficilement aux points voisins.

627. Propriétés conductrices des toiles métalliques. — Lampes de sûreté. — Lorsqu'on place une toile métallique en travers de la flamme d'une bougie ou d'un bec de gaz, on constate que la flamme ne se conserve plus qu'*au-dessous* de la toile. Ce résultat est dû à ce que la toile métallique, qui est conductrice, refroidit rapidement les gaz qui la traversent, et les amène à une température inférieure à la température de combustion. — Cependant on peut s'assurer que les gaz combustibles traversent la toile métallique, en plaçant *au-dessus* d'elle une allumette enflammée : il se produit alors en ce point une nouvelle flamme.

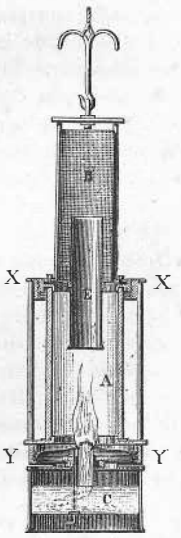


Fig. 425.
Lampe de sûreté

C'est sur ces propriétés des toiles métalliques qu'est fondée la construction des lampes de sûreté, destinées à préserver des explosions du *grisou* les ouvriers qui travaillent dans les mines de houille. — La lampe imaginée par Davy a reçu d'importantes modifications; la figure 425 représente une lampe de sûreté perfectionnée. Elle se compose d'une lampe ordinaire à huile C, surmontée d'un cylindre de verre A, qui se termine par une toile métallique B. Les produits de la combustion, en partie entraînés par la cheminée E, s'échappent dans l'atmosphère en traversant B; l'autre partie séjourne dans la région A, où elle se

mélange avec l'air extérieur qui pénètre à travers la toile métallique B (*). La proportion de l'air autour de la flamme est donc limitée par le jeu même de l'appareil : elle est juste suffisante pour l'entretien de la combustion. — Supposons que l'atmosphère de la mine contienne une proportion notable de gaz hydrogène carboné, dont le mélange avec l'air produirait, à l'approche d'un corps enflammé, une détonation redoutable. A mesure que ce gaz pénètre dans l'appareil, il se mélange avec les produits de la combustion, en sorte qu'il ne peut plus, en général, prendre feu au contact de la flamme. D'ailleurs, si le mélange prend feu, la combustion ne peut pas se propager à l'extérieur, la toile métallique B ayant pour effet de refroidir les produits de la combustion.

628. Conservation de la chaleur. — Pour conserver la chaleur, pendant l'hiver, à l'intérieur de nos appartements, les murs de pierre doivent avoir une épaisseur assez considérable, parce que la pierre est un corps assez conducteur; la brique, qui est moins conductrice, est préférable sous ce rapport. — Il faut remarquer aussi que, dans nos appartements, c'est surtout par la surface des vitres que la chaleur se perd au dehors. Dans les pays froids, on rend la déperdition beaucoup moindre, en employant des doubles fenêtres, qui emprisonnent entre elles une couche d'air.

Les animaux des pays froids ont le corps couvert d'une fourrure; nous nous couvrons, pour nous préserver du froid, soit de fourrures, soit d'étoffes de laine, ou de vêtements ouatés. — L'efficacité de tous ces moyens de protection s'explique toujours de la même manière : c'est la *couche d'air* maintenue immobile, par les poils de la fourrure ou par les filaments de l'étoffe, qui joue surtout ici le rôle de corps mauvais conducteur. Pour qu'un vêtement soit chaud, l'important n'est pas qu'il soit lourd, mais que le tissu soit assez moelleux pour n'avoir qu'un poids relativement faible, sous une assez grande épaisseur. — C'est ainsi encore qu'un édredon, formé de plumes très légères, constitue une sorte de coussin d'air, préservant mieux du froid qu'une couverture d'un tissu serré.

Pour soustraire des *corps froids* à l'influence de la chaleur extérieure, c'est encore à des moyens analogues qu'on a recours. — Les *glacières*, où l'on conserve, jusque pendant l'été, la glace qu'on y a accumulée pendant l'hiver, sont de vastes cavités, creusées dans le sol. La paroi est formée par une maçonnerie, garnie d'une double paroi de bois dans laquelle on entasse de la poussière de charbon; la cavité est fermée par un toit, placé au niveau du sol, et couvert de paille.

(*) Dans quelques modèles, l'air extérieur traverse, avant d'arriver à la flamme, une deuxième toile métallique annulaire, disposée horizontalement entre la cheminée E et le manchon A.

LIVRE CINQUIÈME

ÉLECTRICITÉ ET MAGNÉTISME

CHAPITRE PREMIER

ÉLECTRICITÉ STATIQUE

I. — PHÉNOMÈNES FONDAMENTAUX.

629. Électrisation des corps par frottement. — On sait, depuis une époque fort reculée, que l'ambre jaune ou succin (ἤλεκτρον), lorsqu'on le frotte, acquiert la propriété d'attirer les corps légers, tels que des barbes de plume, ou de petits fragments de papier; cette propriété fut attribuée à une cause spéciale, qui prit le nom d'*électricité*.

En 1550, Gilbert, médecin de la reine Élisabeth d'Angleterre, reconnut la même propriété dans un grand nombre d'autres corps, comme la résine, le soufre, le verre. — D'autres substances, comme les métaux, le bois, tenues à la main et frottées, ne paraissaient pas s'électriser : on va voir que ces exceptions ne sont qu'apparentes.

630. Corps conducteurs. — Au commencement du XVIII^e^ siècle, à la suite des expériences du physicien anglais Gray, on reconnut que tous les corps peuvent s'électriser par frottement. Si l'on frotte un cylindre métallique A (*fig.* 426), en le tenant *par un manche de verre* M, on constate que le métal acquiert la propriété d'attirer les corps légers, et cette propriété se manifeste, non seulement aux points frottés, mais *sur toute la surface* du cylindre. — Tout se passe donc, dans cette expérience, comme si l'électricité était due à une sorte de fluide, que le frottement ferait apparaître, et qui se répandrait sur toute la surface du métal; le manche de verre lui opposerait une barrière infranchissable.

Fig. 426.

Nous appellerons *corps conducteurs*, les corps tels que les métaux, le bois, l'ivoire, le chanvre, qui paraissent n'opposer qu'une résistance insensible à la propagation de l'électricité. — Le sol doit être considéré comme un corps conducteur : le cylindre électrisé A,

mis en communication avec le sol par un fil métallique, perd toute trace d'électricité. — Il en est de même quand on touche le cylindre A avec la main : le corps de l'expérimentateur est donc aussi un bon conducteur.

631. Corps mauvais conducteurs, ou isolants. — Nous appellerons corps *mauvais conducteurs*, les corps tels que le verre, la résine, le caoutchouc, la soie, qui opposent une résistance au passage du fluide électrique : ainsi, un bâton de résine étant frotté à son extrémité, les points frottés manifestent seuls la propriété électrique. — Dans l'expérience précédente, le manche de verre M (*fig.* 426), qui empêche l'électricité du cylindre A de se perdre dans le sol, prend le nom de corps *isolant*. — L'air est un isolant : s'il en était autrement, l'électricité développée à la surface des corps se perdrait dans l'atmosphère, et les phénomènes électriques nous seraient probablement inconnus.

632. Distinction des deux espèces d'électricités. — En 1733, les expériences du physicien français Du Fay montrèrent que le frottement peut développer des électricités de deux espèces différentes. — Pour répéter ces expériences, nous emploierons, comme corps léger, un *pendule électrique* (*fig.* 427), formé par une petite balle de moelle

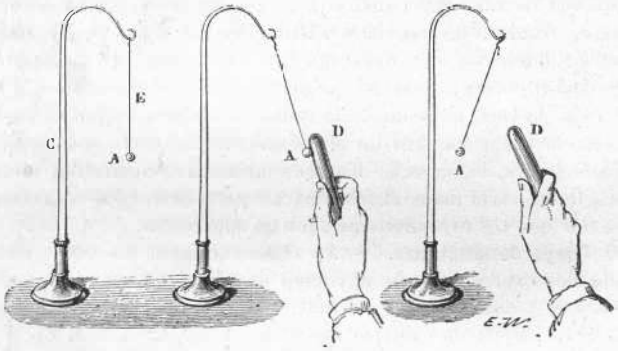


Fig. 427 et 428. Fig. 429.

Distinction des deux électricités.

de sureau A suspendue à un fil de soie E, qui est fixé lui-même à un support de verre C. La balle de sureau, isolée par la soie et le verre, gardera l'électricité qui pourra lui être communiquée.

Approchons d'abord de la balle de sureau un bâton de résine D, frotté avec du drap. Elle est attirée ; mais, dès qu'elle a touché la résine (*fig.* 428), elle est *repoussée*, comme le représente la figure 429. Or, en touchant la résine, la balle a pris une partie de son électricité ; donc deux corps chargés de l'électricité de la résine se repoussent. — Approchons maintenant, de la balle ainsi électrisée par la résine, un

bâton de verre frotté avec un morceau de drap : elle est *attirée*. L'électricité du verre est donc différente de celle de la résine. — Pour distinguer entre elles ces deux électricités, nous les appellerons provisoirement *électricité vitrée* et *électricité résineuse*.

Nous pouvons maintenant reprendre cette expérience, en opérant avec les deux mêmes corps dans un ordre inverse. — Après avoir touché la balle de sureau avec la main, pour conduire dans le sol l'électricité qu'elle avait reçue, nous en approcherons le bâton de verre électrisé : la balle viendra toucher le verre, et, après lui avoir pris une partie de son électricité, elle sera *repoussée*; donc deux corps chargés d'électricité vitrée se repoussent, aussi bien que deux corps chargés d'électricité résineuse. — Au contraire, la balle ainsi chargée d'électricité vitrée est *attirée* par la résine.

On peut constater enfin que, si l'on prend un corps quelconque, électrisé par frottement, et si on le présente successivement à deux pendules, dont l'un aura été chargé d'électricité vitrée, et l'autre d'électricité résineuse, ce corps exerce toujours une répulsion sur l'un de ces pendules et une attraction sur l'autre, c'est-à-dire qu'il manifeste toujours, soit les propriétés de l'électricité *vitrée*, soit les propriétés de l'électricité *résineuse*. — Il n'y a donc pas lieu de distinguer une troisième électricité, et les deux dénominations précédentes suffisent pour caractériser la nature de toutes les charges électriques.

De l'ensemble de ces expériences, on peut tirer les conclusions générales suivantes :

1° *Il y a deux espèces d'électricités, et deux seulement;*

2° *Deux corps chargés d'une même électricité se repoussent;*

3° *Deux corps chargés d'électricités contraires s'attirent.*

Cependant les expressions d'électricité *résineuse* et d'électricité *vitrée* semblent faire dépendre la nature de l'électricité développée dans un corps, par le frottement, de la nature de ce corps lui-même; or, l'expérience montre qu'un même corps peut prendre l'une ou l'autre électricité, selon les circonstances. Ainsi, le verre poli prend l'électricité vitrée, s'il est frotté avec une étoffe de laine; mais, s'il est frotté avec une peau de chat, il prend l'électricité résineuse. Aussi a-t-on remplacé l'expression d'électricité vitrée par celle d'électricité *positive*, et l'expression d'électricité résineuse par celle d'électricité *négative*.

633. Deux corps frottés l'un contre l'autre prennent des électricités contraires. — En frottant un bâton de verre avec du drap, nous avons constaté que le verre s'électrise. Mais le drap ne s'électrise-t-il pas aussi? L'expérience, telle que nous l'avons faite, ne permet pas de répondre à cette question; car, le drap étant conducteur et étant tenu à la main, l'électricité qui pourrait s'y développer se perdrait dans le sol.

Modifions donc l'expérience, et prenons un morceau de drap tendu sur un plateau de bois B (*fig.* 450), supporté lui-même par un manche

de verre isolant. Prenons également un plateau de verre C, supporté par un manche pareil. Après avoir frotté les deux plateaux l'un contre l'autre, approchons-les tour à tour d'un pendule que nous aurons chargé, par exemple, d'électricité négative : ce pendule est attiré par le verre et repoussé par le drap. Donc, le frottement n'a pas seulement développé de l'électricité positive dans le verre; il a aussi développé de l'électricité négative dans le drap. — En général, deux corps frottés l'un contre l'autre acquièrent des électricités contraires (*).

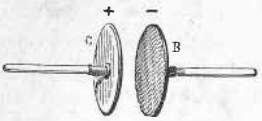


Fig. 430.
Deux corps frottés prennent des électricités contraires.

634. Hypothèse des deux fluides. — Pour interpréter les deux faits fondamentaux que nous venons de constater, savoir : le *développement d'électricités contraires* dans deux corps frottés l'un contre l'autre, et les *attractions* ou *répulsions* qui se manifestent entre les corps électrisés, il est commode d'avoir recours à l'hypothèse des deux fluides électriques, qui a été émise par le physicien anglais Symmer.

D'après cette hypothèse, tous les corps, à l'état *neutre*, contiendraient naturellement deux fluides électriques d'espèces contraires, le *fluide positif* et le *fluide négatif*, en quantités égales. Le frottement de deux corps aurait pour effet de faire passer sur l'un d'eux une partie du fluide positif de l'autre, et sur le second une partie du fluide négatif du premier : par suite, après la séparation, l'un des corps manifesterait, d'une manière prédominante, les propriétés du fluide positif; l'autre, les propriétés du fluide négatif. — Enfin, pour expliquer les attractions ou les répulsions qui se produisent entre les corps électrisés, il suffit d'admettre que les molécules *d'un même fluide* se repoussent entre elles, et que les molécules des fluides *de noms contraires* s'attirent (**).

635. Influence électrique. — Développement simultané des électricités contraires dans un corps conducteur, placé au voisinage d'un corps électrisé. — On peut faire apparaître les propriétés électriques

(*) On a pu dresser des tableaux dans lesquels les corps sont classés dans un ordre tel, que chacun d'eux prend l'électricité positive, s'il est frotté par l'un des corps qui le suivent, et l'électricité négative, s'il est frotté par l'un des corps qui le précèdent. Voilà l'un de ces tableaux :

1. Peau de chat.	4. Plumes.	7. Soie.
2. Verre poli.	5. Bois.	8. Gomme laque.
3. Drap de laine.	6. Papier.	9. Verre dépoli.

(**) D'après une autre hypothèse, due à Franklin, il n'existerait qu'un seul fluide électrique. — Des corps à l'état neutre en contiendraient chacun une quantité normale, en sorte que l'existence de ce fluide ne s'y manifesterait pas. — Deux corps étant frottés, une partie du fluide électrique de l'un passerait sur l'autre, en sorte que, après la séparation, le premier, contenant une quantité de fluide moindre que sa dose normale, serait à l'état *négatif*; le second, contenant une quantité de fluide supérieure à sa dose normale, serait à l'état *positif*.

dans un corps conducteur, sans avoir recours au frottement, et sans le mettre en contact avec un corps électrisé.

Soit, par exemple, un cylindre métallique BC (*fig.* 431), isolé par un pied de verre et portant à chacune de ses extrémités un couple de pendules, formés de balles de sureau suspendues à des fils conducteurs de lin. — Ce cylindre étant à l'état neutre, si l'on en approche une sphère métallique A, supportée par un pied de verre, et chargée, par exemple, d'électricité positive, on voit aussitôt les pendules de chaque couple s'écarter l'un de l'autre. On peut constater qu'un bâton de résine, électrisé négativement, et approché *lentement* des pendules de l'extrémité B, les repousse; un bâton de verre, chargé d'électricité positive et approché *lentement* des pendules de l'extrémité C, les repousse également (*). — Donc, sous l'*influence* de l'électricité de A, les deux électricités contraires, dont la réunion constituait l'état neutre, se sont séparées : l'électricité positive, de même nom que celle de la sphère, a été repoussée en C, dans la région la plus éloignée; l'électricité négative, de nom contraire à celle de la sphère, a été attirée en B. Entre les deux régions chargées d'électricités contraires, se trouve une ligne à l'état neutre. — Si l'on éloigne la sphère A, les deux couples de pendules retombent, c'est-à-dire que le cylindre revient à l'état neutre.

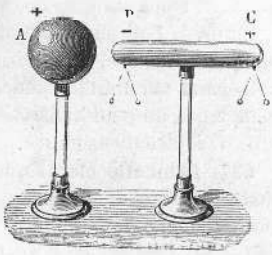


Fig. 431.
Développement d'électricité par influence.

Dans cette expérience, on dit que la sphère a joué le rôle de corps *influent*, ou *inducteur*; le cylindre a joué le rôle de corps *influencé*, ou *induit*.

636. Cas où le corps influencé est mis en communication avec le sol. — Si, laissant la sphère influente A en présence du cylindre influencé, on met un point du cylindre en communication avec le sol, en le touchant avec le doigt (*fig.* 432), on voit les pendules de l'extrémité C retomber; au contraire, ceux de l'extrémité B divergent un peu plus qu'auparavant. — On comprend,

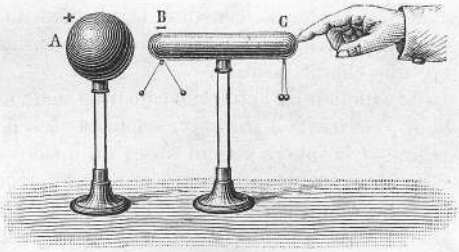


Fig. 432.

(*) On verra plus loin (638, *Rem.*) pourquoi on doit approcher *lentement* le bâton de résine ou le bâton de verre, des pendules sur lesquels ils doivent agir par répulsion.

en effet, que l'électricité positive repoussée a dû être conduite dans le sol. L'électricité négative a été maintenue en B par l'attraction de la sphère ; elle s'est même accrue de celle qui provient de l'action exercée par la sphère sur la main, et sur tout le système des corps conducteurs qui font communiquer le cylindre avec le sol.

Enfin, si l'on supprime alors la communication avec le sol, et qu'on éloigne la sphère, l'électricité négative, n'étant plus maintenue en B, se répand sur tout le cylindre : les pendules des deux extrémités divergent, mais on peut constater qu'ils sont chargés d'une même électricité, l'électricité négative.

637. Étincelle électrique — Communication de l'électricité à distance. — Lorsqu'on approche, d'une machine électrique chargée positivement, une sphère conductrice isolée par un pied de verre (*fig.* 453), l'électricité positive de la sphère est repoussée dans la région la plus éloignée de la machine ; l'électricité négative vient s'accumuler dans les points qui en sont le plus voisins. Si l'on diminue progressivement la distance, l'attraction qui s'exerce entre les électricités contraires peut devenir suffisante pour déterminer la combinaison brusque de ces deux électricités, à travers la couche d'air mauvais conducteur : cette combinaison, s'effectuant avec lumière et avec bruit, constitue le phénomène de l'*étincelle*. — Après l'étincelle, la machine a perdu une partie de sa charge, et la sphère conserve une charge positive.

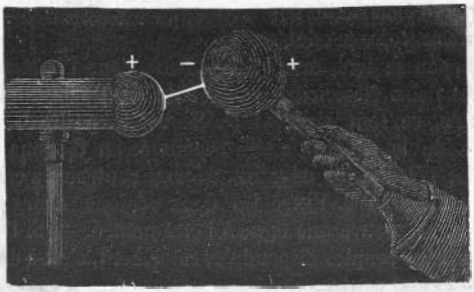


Fig. 453. — Charge par étincelles.

La production de l'étincelle constitue donc une sorte de *communication de l'électricité à distance*, semblable à celle qui se produirait si la machine et la sphère étaient mises un instant en contact.

638. Mouvements imprimés aux corps légers par les corps électrisés. — Quand on présente un bâton de verre électrisé positivement, à une balle de sureau chargée d'électricité négative, il y a *attraction* : si on le présente à une balle de sureau chargée d'électricité positive, il y a *répulsion*. — Ce sont les faits fondamentaux qui ont servi à établir la distinction entre les deux électricités (632) : ces mouvements montrent simplement que les corps peuvent être entraînés par les actions réciproques des électricités qui se trouvent à leur surface.

Mais c'est par le développement de l'électricité *par influence* qu'on peut expliquer les mouvements que les corps électrisés, positivement ou négativement, impriment aux corps légers conducteurs *préalablement à l'état neutre*. — Présentons, par exemple, un bâton de verre V (*fig.* 434), chargé d'électricité positive, à une balle de sureau BC, supportée par un fil de soie, et à l'état neutre : l se développe par influence, dans les régions B et C, de l'électricité négative et de l'électricité positive. La balle de sureau est donc sollicitée par deux forces : 1° l'attraction de l'électricité positive du verre sur l'électricité négative de la région B ; 2° la répulsion de l'électricité positive du verre sur l'électricité positive de la région C. L'attraction, s'exerçant à une distance moindre, l'emporte sur la répulsion, et la balle se met en mouvement vers le bâton de verre (*).

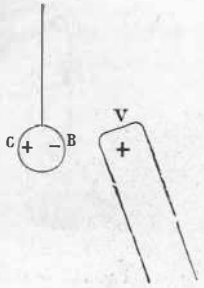


Fig. 434.
Attraction d'un corps léger par un corps électrisé.

Remarque. — Une particularité essentielle à remarquer, c'est que deux corps préalablement chargés d'*électricités de même nom* peuvent exercer l'un sur l'autre une *attraction*, si l'un d'eux est fortement chargé, et si la distance qui les sépare est suffisamment petite. — Prenons, par exemple, un bâton de verre fortement chargé d'électricité *positive*, et présentons-le à une balle de sureau qui aura été électrisée *positivement*. Si la distance est d'abord assez grande pour que le développement d'électricité par influence soit insensible, l'action exercée entre les électricités de même nom se manifestera par une *répulsion* de la balle. Mais si l'on approche davantage, il se développera, sur les deux régions opposées de la balle, des électricités contraires ; en sorte que, à une distance suffisamment petite, il pourra y avoir *attraction* de la balle.

De là, la nécessité d'approcher toujours *lentement* les corps les uns des autres, dans les expériences où l'on a pour but de décider, d'après le sens du mouvement observé, si ces corps sont chargés d'une même électricité, ou d'électricités contraires. Si on les approchait trop brusquement, on pourrait n'observer qu'une attraction, alors même que les corps seraient chargés d'une même électricité.

639. Expériences de la grêle électrique, du carillon électrique, etc. — Dans les expériences de la *grêle électrique* ou du *carillon électrique*, des corps légers, tels que des balles de sureau placées entre deux conducteurs métalliques, dont l'un communique avec la machine élec-

(*) Un corps léger mauvais conducteur, tel que la gomme laque en poudre, à l'état neutre, étant placé à proximité d'un corps électrisé, il ne s'y développe pas d'électricité par influence, *dans les premiers instants* ; aussi n'éprouve-t-il d'abord aucune attraction sensible.

trique et l'autre avec le sol (*fig.* 435), ou des balles métalliques *b b'*, suspendues par des fils de soie, entre des timbres métalliques (*fig.* 436), sont animés de mouvements de va-et-vient, dès que l'on fait fonctionner

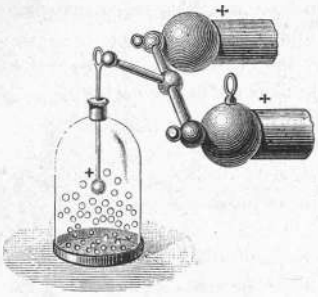


Fig. 435. — Grêle électrique.

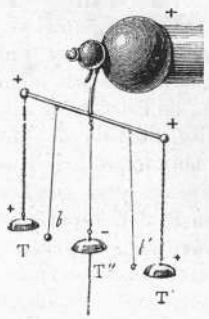


Fig. 436. — Carillon électrique

la machine. — En effet, en venant d'abord toucher le conducteur qui communique avec la machine, elles se chargent positivement et sont repoussées; en venant ensuite toucher le conducteur qui communique avec le sol, et qui est électrisé par influence, elles se chargent négativement, sont repoussées, et ainsi de suite (*).

640. Influence électrique, dans le cas où le conducteur induit enveloppe complètement l'inducteur. — Théorème de Faraday. — En général, quand un conducteur relié au sol, comme le cylindre de la figure 432, est placé dans le voisinage d'un corps électrisé, la charge induite est moindre que la charge inductrice. A plus forte raison en est-il ainsi quand ce conducteur est isolé, puisque la charge induite, de nom contraire à la charge inductrice, ne peut qu'augmenter lorsqu'on vient à le relier au sol (636). — Mais, lorsqu'un corps électrisé est placé dans une salle, tous les corps conducteurs placés autour de lui, à une distance plus ou moins grande, sont soumis à l'influence électrique; en particulier, les murs, le plafond, le plancher de la salle, constituent un conducteur qui l'entoure complètement, et qui doit être considéré comme s'électrisant par influence. L'expérience suivante, due à Faraday, montre que *la quantité d'électricité développée par influence, dans tout l'espace qui environne un corps électrisé, est égale à la quantité d'électricité inductrice.*

Soit un cylindre métallique creux A, en communication avec deux feuilles d'or, isolées par une cloche de verre E (*fig.* 437). Si l'on des-

(*) C'est par des effets de ce genre que Volta explique le bruissement qui se produit dans la région des nuages, avant la chute de la grêle. D'après Volta, les grêlons, avant leur chute, sont animés d'un mouvement de va-et-vient, entre deux nuages chargés d'électricités contraires; ils s'entrechoquent avec bruit, et ce sont ces frottements qui leur donnent leurs formes arrondies.

cend progressivement à l'intérieur du cylindre une sphère métallique C, isolée par un fil de soie, et électrisée positivement, la divergence croissante des feuilles d'or montre que la quantité d'électricité positive, repoussée par le corps inducteur C, va d'abord progressivement en croissant. Mais, lorsque la boule a dépassé le milieu du cylindre, c'est-à-dire lorsque le corps inducteur C est presque complètement enveloppé par le corps induit, on n'augmente plus l'écart des feuilles en continuant à faire descendre la sphère C. — Dans ces conditions, il est facile de constater que les quantités d'électricité positive et négative, induites sur les deux faces du cylindre, sont égales, l'une et l'autre, à la charge de la sphère C. — En effet, si l'on met alors la boule en contact avec la paroi intérieure du cylindre, la divergencedes feuilles reste la même : la charge de la surface extérieure du cylindre A n'a donc pas varié. Or nous verrons plus loin que, après le contact, il ne peut plus exister d'électricité sur la surface intérieure du cylindre. Il en faut donc conclure que, au moment du contact, la charge positive de la sphère et la charge négative du cylindre se sont neutralisées; c'est-à-dire que, avant le contact, la charge induite *sur la surface intérieure* du cylindre était égale et de signe contraire à la charge de l'inducteur; par suite, la charge induite *sur la surface extérieure* était égale, en grandeur et en signe, à celle de l'inducteur.

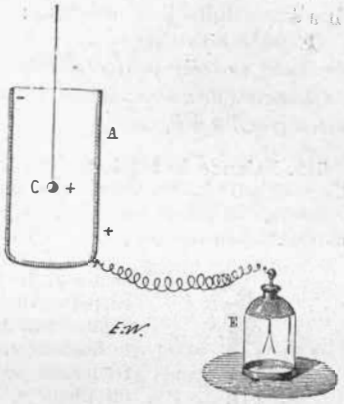


Fig. 437. — Expérience de Faraday.

Si maintenant on recommence l'expérience, et si, la boule inductrice chargée positivement étant à une certaine distance de la paroi du cylindre, on met le cylindre en communication avec le sol, l'électricité positive de sa surface extérieure s'écoule dans le sol, et les feuilles d'or retombent; mais il est facile de voir que la charge négative induite sur sa surface intérieure *n'a pas augmenté*. En effet, si l'on interrompt alors la communication du cylindre avec le sol, et qu'on mette la boule en contact avec la paroi intérieure, il ne se produit aucune divergence des feuilles. Le contact a donc eu pour effet d'amener le cylindre à l'état neutre, c'est-à-dire que, dans ce cas encore, la charge négative induite avant le contact était *égale à la charge positive de l'inducteur*.

II. — LOIS DES ACTIONS ÉLECTRIQUES. — MASSES ÉLECTRIQUES. — CHAMP ÉLECTRIQUE.

641. Les actions électriques sont en raison inverse des carrés des distances (loi de Coulomb). — Coulomb a déterminé, par des expériences précises, la loi suivant laquelle varient les actions, attractives ou répulsives, qui s'exercent entre deux petites sphères conductrices chargées d'électricité, quand on fait varier la distance qui les sépare. Il a été conduit à la loi suivante :

Les forces répulsives ou attractives qui s'exercent entre deux corps conducteurs de très petites dimensions (éléments conducteurs), chargés d'électricités de même nom ou de noms contraires, sont en raison inverse des carrés des distances.

642. Balance de torsion. — La balance de torsion, imaginée en 1785 par Coulomb pour établir cette loi, est représentée par la figure 458.

Une tige de gomme laque *bod*, qui porte en *b* une boule en moelle de sureau dorée, est soutenue par un fil d'argent, dans l'axe d'une cage de verre cylindrique. L'extrémité supérieure du fil est fixée dans un bouton *f*, mobile autour de l'axe du tambour *t* qui le supporte; on peut évaluer la rotation, en observant le déplacement du repère *r* sur une graduation tracée sur le tambour *t*. Ce tambour *t* est lui-même mobile, à frottement dur, sur le tambour fixe *t'*. — Une boule métallique *a*, isolée par une tige de verre, peut être introduite dans la cage à la hauteur de *b*, de telle sorte que la balle de sureau *b* vienne toucher la boule *a*, et prendre sa place quand on retire *a*. Dans le même plan horizontal, la cage porte une division en degrés, dont le zéro est situé en face de *a*.

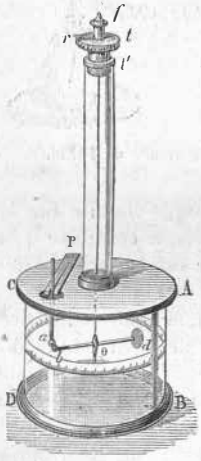


Fig. 458.
Balance de Coulomb.

Pour *régler* la balance, on enlève d'abord la boule *a*; on amène le repère *r* vis-à-vis le zéro de la graduation *t*; enfin, en soulevant le tambour *t*, de manière qu'il tourne librement à l'intérieur du tambour *t'*, on fait en sorte que la balle de sureau *b* arrive à se placer vis-à-vis le zéro de la graduation de la cage, c'est-à-dire à la place que viendra occuper la boule *a*.

L'appareil étant ainsi préparé, on électrise la boule *a* et on l'introduit dans la cage; l'électricité se partage entre les deux boules conductrices *a* et *b*, et la boule *b* est repoussée. Dans l'une des expériences de Coulomb la distance angulaire des deux boules était de 36°; la torsion du fil était donc de 36°, et comme on sait que *la force de torsion est proportionnelle à l'angle de torsion*, la force répulsive qui s'exerçait entre les deux boules, à une distance représentée par 36°, était équilibrée par une force de torsion que l'on pouvait représenter par le même nombre. — En tournant alors le bouton *f* en sens inverse du déplacement de la balle *a*, on ramenait la distance angulaire à n'être plus que de 18°; la position du repère *r* montrait qu'il avait fallu tourner le bouton *f* de 126°; la torsion

totale du fil était alors $18^0 + 126^0$, ou 144^0. La force répulsive, qui s'exerçait entre les deux boules, à une distance représentée par 18, était donc équilibrée par une force de torsion représentée par 144. — Or, dans la deuxième expérience, la distance 18 était *la moitié* de la distance 36 dans la première expérience; la force répulsive 144 était *quatre fois plus grande* que la force répulsive primitive 36. — La *loi des distances* était donc ainsi vérifiée.

643 Masses électriques. – Considérons un corps conducteur électrisé A, de dimensions très petites, et supposons qu'on mesure la force répulsive qu'il exerce, à une distance déterminée, sur une petite sphère conductrice *a*, chargée d'une électricité de même nom. Si, en laissant invariable la charge de la sphère *a*, et en augmentant progressivement celle du corps A, on arrive à faire que, à la même distance, la force répulsive devienne double ou triple, on dira que la charge de A est devenue double ou triple. — D'une manière générale, on considère la charge ou la *masse électrique* d'un élément conducteur électrisé, comme proportionnelle à la force qu'il exerce, à une distance déterminée, sur une petite sphère conductrice dont la charge reste constante. — La charge de l'élément et celle de la sphère sont de même nom ou de noms contraires, suivant que la force est répulsive ou attractive.

Quelles que soient l'unité de longueur et l'unité de force qu'on adopte, il est particulièrement simple de prendre, comme *unité de masse électrique*, la charge d'un élément conducteur dont l'action sur un autre élément chargé d'une masse *égale*, et placé à l'*unité de distance*, est égale à l'*unité de force*. — Alors, si la charge de l'un des éléments devient de q unités, la force devient q fois plus grande; si la charge de l'autre élément devient de q' unités, la force devient encore q' fois plus grande; enfin, si les éléments sont amenés à la distance r, la force devient r^2 fois plus petite; son expression est donc :

$$f = \frac{qq'}{r^2}.$$

Cette force est d'ailleurs répulsive ou attractive, selon que les charges q et q' sont de même nom ou de noms contraires.

En particulier, l'action réciproque de deux masses électriques, toutes deux égales à q, placées à la distance r, serait :

$$f = \frac{q^2}{r^2}.$$

644. Unité électrostatique C.G.S. de masse électrique — Dans le système C.G.S. la valeur de l'*unité de masse électrique*, unité dérivée, se déduit immédiatement de la formule $f = \frac{q^2}{r^2}$. Si l'on fait $f = 1$ et $r = 1$, on a $q = 1$. *L'unité de masse électrique positive* est donc *la quantité d'électricité vitrée, qui, agissant sur une charge égale, placée à un centimètre de distance, produit une répulsion d'une dyne.* — L'unité

de masse électrique négative est celle qui exerce sur l'unité de masse positive, à un centimètre de distance, une attraction d'une dyne.

L'unité ainsi définie a été appelée unité *électrostatique*, pour la distinguer d'une autre unité de quantité d'électricité, l'unité *électromagnétique*, qui sera définie plus loin.

645. Unité pratique de masse électrique : coulomb. — L'unité électrostatique C.G.S. qui vient d'être définie est une quantité d'électricité extrêmement petite. Avec cette unité, les masses électriques mises en jeu dans les applications industrielles seraient exprimées par des nombres extrêmement grands. Pour ces évaluations, on fait usage d'une *unité pratique de masse électrique*, le *coulomb*, qui vaut 3×10^9 unités électrostatiques C.G.S.

Pour nous faire une idée de la grandeur du coulomb, calculons, par exemple, la force répulsive qui s'exercerait entre deux corps conducteurs chargés chacun d'un coulomb, et distants de 10 kilomètres. La valeur de cette force, en dynes, serait

$$f = \frac{q\,q'}{r^2} = \frac{3 \times 10^9 \times 3 \times 10^9}{(10^6)^2} = 9 \times 10^6,$$

c'est-à-dire 9 mégadynes, ou environ 9 kilogrammes.

646. Addition des masses. — Masses positives, masses négatives — Supposons que, après avoir mesuré séparément les charges q et q' de deux éléments conducteurs A et A', par les actions qu'ils exercent, à une distance donnée, sur une petite sphère électrisée, on mette ces deux éléments en contact, de manière à n'en former qu'un seul; on pourra, par le même procédé, mesurer la charge résultante Q. — En procédant ainsi, on ferait les deux constatations suivantes :

1° Si les charges initiales q et q' sont *de même nom*, la charge résultante Q a pour mesure la somme $q + q'$ des charges initiales.

2° Si les charges initiales q et q' sont *de noms contraires*, la charge résultante Q, de même nom que la plus grande des charges initiales, a pour mesure la différence des valeurs absolues de ces charges.

Par suite, si l'on représente les quantités d'électricité vitrée ou résineuse par des nombres positifs ou négatifs, la charge résultant de leur réunion sera toujours représentée par leur somme algébrique. — Cette considération justifie les noms d'*électricité positive* et d'*électricité négative*, donnés à l'électricité vitrée et à l'électricité résineuse.

647. Champ électrique. — Force électrique en un point du champ. — Lignes de force. — Lorsque, dans le voisinage d'un corps ou d'un système de corps électrisés, on explore les divers points de l'espace au moyen d'un corps conducteur léger, tel que la balle de sureau d'un pendule électrique (*fig.* 428), isolée par un fil de soie, et chargée d'une masse d'électricité positive assez petite pour ne pas modifier par influence l'état d'électrisation des corps voisins, on constate que, en chaque point,

la balle de sureau est sollicitée à se mouvoir dans une direction déterminée. — On appelle *champ électrique*, la région de l'espace dans laquelle s'exerce une pareille action.

En un point donné du champ, la force F qui sollicite le pendule est la résultante des actions de toutes les masses électriques du système, sur la charge q qu'il possède; elle est donc proportionnelle à q, et le rapport $\frac{F}{q}$ représente la force qui solliciterait *l'unité de masse électrique positive*, qui serait placée en ce point du champ : c'est ce qu'on appelle la *force électrique* en ce point. — La grandeur et la direction de cette force caractérisent l'*intensité du champ* au point considéré.

On appelle *ligne de force*, une ligne tracée dans le champ, et définie par cette condition, qu'elle soit, en tous ses points, tangente à la direction de la force électrique ; le *sens* de cette ligne est, en chaque point, celui de la force elle-même.

Considérons, par exemple, le cas particulièrement simple où le système de corps électrisés se réduit à une sphère A (fig. 459), de rayon très petit, et chargée d'une masse q d'électricité positive : nous la supposerons placée dans une enceinte conductrice, de très grandes dimensions, et communiquant avec le sol. Le champ électrique s'étend dans tout l'espace environnant, jusqu'aux parois de l'enceinte. En un point P, situé à une distance d de la sphère, la force électrique est dirigée suivant AP, et a pour valeur $\frac{q}{d^2}$; les lignes de force sont des lignes droites AP, AR, AS.... Au voisinage des parois de l'enceinte, à une grande distance du point A, la force électrique est sensiblement nulle. — Si la petite sphère A était chargée négativement, la force électrique au point P serait dirigée suivant PA ; les lignes de force PA, RA, SA..., partant des parois de l'enceinte, aboutiraient au point A.

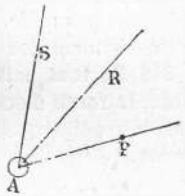


Fig. 459.

Remarque. — En un point M, situé en dehors de l'enceinte, à une distance D du point A, la force électrique $\frac{q}{D^2}$, produite par la charge q du point A, est *rigoureusement* annulée par une force électrique égale et contraire, provenant de la charge $-q$, induite sur la paroi interne de l'enceinte (640). Donc, si des corps électrisés sont placés *à l'intérieur* d'une enceinte conductrice, communiquant avec le sol, le champ électrique est toujours limité aux parois de l'enceinte. — Si les masses électriques sont toutes placées *à l'extérieur* de l'enceinte, l'intérieur de l'enceinte ne fait pas partie du champ. — Ce sont ces résultats qu'on exprime en disant qu'une enceinte conductrice fermée en communication avec le sol, constitue un *écran électrique*.

648. La force électrique est toujours nulle à l'intérieur d'un corps conducteur en équilibre. — Corps diélectriques. — L'état neutre d'un corps peut toujours être considéré comme résultant de la présence, en chacun de ses points, de masses égales d'électricités positive et négative. Si, en un point pris à l'intérieur d'un corps *conducteur*, la force électrique n'était pas nulle, l'équilibre ne pourrait pas subsister; l'électricité positive se déplacerait dans le sens de la force électrique, l'électricité négative se déplacerait en sens contraire. Il se produirait ainsi, dans deux régions opposées du conducteur, une accumulation des deux électricités contraires, jusqu'à ce que la force électrique arrivât à être nulle en tous les points intérieurs. C'est ce que l'on constate dans le phénomène de l'influence électrique (635). — D'une manière générale, quand un corps *conducteur* est en équilibre électrique, la force électrique est nulle en tous les points situés *à l'intérieur* : un corps conducteur ne fait donc jamais partie du champ électrique.

C'est donc exclusivement dans les corps *mauvais conducteurs*, que *se propage* l'action électrique. Ces corps ont été désignés par Faraday sous le nom de *corps diélectriques*. — L'équilibre peut subsister dans ces corps, lors même que la force électrique en chacun de leurs points ne serait pas nulle, en raison de la résistance que ces corps opposent au mouvement des deux électricités.

649 En tout point de la surface d'un corps conducteur en équilibre, la force électrique est normale à la surface. — Si l'on considère un point quelconque, pris sur la surface même d'un corps conducteur, l'équilibre ne peut subsister que si la force électrique est *normale à la surface*. — En effet, si elle était oblique, on pourrait la remplacer par deux composantes, l'une normale à la surface, l'autre dirigée dans un plan tangent à la surface. Cette dernière tendrait à mettre l'électricité en mouvement sur la surface du conducteur; l'équilibre ne saurait donc subsister.

Remarque. — Il en résulte que, quand l'équilibre est établi dans un système, les lignes de force du champ électrique rencontrent normalement les surfaces des divers corps conducteurs. Par suite, en tout point *extérieur* à l'un de ces conducteurs, mais suffisamment voisin de sa surface, la force électrique doit encore être considérée comme ayant une direction *normale à cette surface*.

650. Flux de force sortant d'une surface fermée, prise arbitrairement dans un champ électrique. — Théorème de Gauss. — Soit P un point pris dans un champ électrique (*fig.* 440), et F une droite qui représente, en grandeur et en direction, la force électrique en ce point; considérons un élément plan AB, de surface s, mené par P perpendiculairement à la direction de la force. — Imaginons maintenant que, par la surface s, on fasse passer des lignes de force (lignes généralement courbes), en nombre égal, par unité de surface, à la valeur nu-

mérique F de l'intensité du champ au point P : le nombre de ces lignes qui passeront par la surface s sera sF. Ce nombre peut être considéré comme représentant, en quelque sorte, la quantité de force électrique correspondante à tous les points de la surface AB. C'est ce qu'on appelle le *flux de force* relatif à cette surface. En ayant égard au sens des lignes de force, et bien qu'il ne se produise aucun déplacement des points du champ, on dit que le flux de force *traverse la surface* AB *dans le sens* PF. — Remarquons que ce même flux de force traverse également tout élément de surface tel que CD, passant par P, et dont la projection sur le plan de AB serait égale à s.

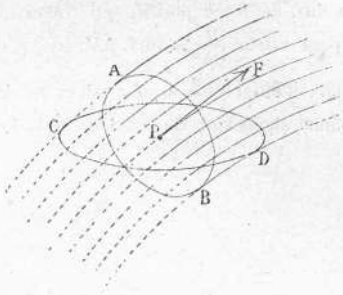


Fig. 440.

Soit maintenant une surface fermée quelconque, prise arbitrairement dans un champ électrique. On conçoit que l'on puisse évaluer le flux de force qui traverse chacun des éléments plans de cette surface. Convenons de compter positivement ou négativement chaque flux de force élémentaire, selon qu'il est dirigé vers l'extérieur ou vers l'intérieur de la surface fermée, et faisons la somme algébrique de tous ces flux. Cette somme est ce que l'on appelle le *flux de force total*, relatif à la surface fermée considérée. — Gauss a démontré la proposition suivante, qui est une conséquence de la loi de Coulomb :

Le flux de force total relatif à une surface fermée est égal, en grandeur et en signe, au produit de la quantité d'électricité comprise à l'intérieur de la surface par le nombre 4π (π étant le rapport de la circonférence au diamètre) (*).

Le théorème de Gauss se démontre facilement, dans le cas particulièrement simple où le champ électrique est produit par *un point unique* O, possédant une charge électrique q, positive par exemple.

Considérons d'abord le cas où le point O est *à l'extérieur* de la surface fermée S (*fig.* 441). — Pour évaluer le flux de force relatif à cette surface,

(*) L'expérience de Faraday (640, *fig.* 437) est d'accord avec cette proposition. — En effet, un corps chargé d'une masse électrique $+q$ étant placé dans la cavité que présente un corps conducteur creux *fermé*, l'expérience montre qu'une charge égale et contraire, $-q$, est induite sur la face interne, tandis qu'une charge $+q$ est induite sur la face externe de l'enveloppe conductrice. Or, si l'on considère une surface fermée, tracée dans l'épaisseur de la paroi, et enveloppant la cavité où est placé le corps inducteur, cette surface comprend dans son intérieur deux masses électriques, la charge inductrice $+q$, et la charge induite de signe contraire $-q$, dont la somme algébrique est identiquement *nulle*. D'autre part, en chaque point de cette surface, qui est à l'intérieur d'un conducteur en équilibre électrique, la force électrique est nulle (648) ; par suite *le flux de force* relatif à cette surface *est nul*.

menons un cône très délié, ayant pour sommet O, et découpant sur la surface deux éléments AB et CD; enfin, du point O comme centre, décrivons trois surfaces sphériques, dont les rayons seront respectivement OA, OC, et une longueur OG égale à l'unité. Le cône découpe, sur ces surfaces sphériques, des surfaces AA′, CC′ et GH, qui sont semblables, de sorte que l'on a :

$$\frac{\text{surf. AA}'}{\text{OA}^2} = \frac{\text{surf. CC}'}{\text{OC}^2} = \frac{\text{surf. GH}}{1^2}.$$

Le flux de force positif, qui traverse l'élément AA′, et aussi l'élément AB, a pour valeur $\frac{q}{\text{OA}^2} \times$ surf. AA′, ou $q \times$ surf. GH; le flux de force négatif, relatif à CC′, et aussi à CD, a pour valeur absolue $\frac{q}{\text{OC}^2} \times$ surf. CC′, ou $q \times$ surf. GH; la somme algébrique de ces deux flux de force élémentaires est identiquement

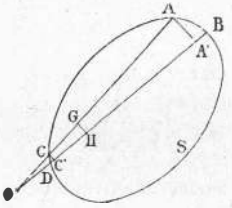


Fig. 441.

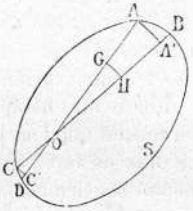


Fig. 442.

nulle. Il en est de même évidemment pour tous les éléments de la surface S, pris deux à deux. Par suite, le *flux de force total*, relatif à la surface fermée S, est nul : résultat conforme à l'énoncé du théorème de Gauss, puisque, dans ce cas, la quantité d'électricité comprise *à l'intérieur de la surface* S est nulle.

Considérons, maintenant, le cas où le point électrisé O est *à l'intérieur* de la surface S (*fig.* 442), et effectuons les mêmes constructions. — Les flux de force relatifs aux divers éléments sont tous de même signe. La valeur du flux de force relatif à AA′, et aussi à AB, est $\frac{q}{\text{OA}^2} \times$ surf. AA′, ou $q \times$ surf. GH. Or, si l'on déplace progressivement l'élément AB sur toute la surface S, l'élément GH se déplace de manière à décrire toute la surface de la sphère de rayon OG égal à l'unité : par suite, le *flux de force total* relatif à la surface S a pour expression le produit de q par la surface de cette sphère, ou $q \times 4\pi$. C'est l'énoncé du théorème de Gauss.

651. Action d'une couche sphérique uniformément électrisée, sur un point intérieur ou sur un point extérieur. — Théorème de Newton. — 1° *En tout point pris à l'intérieur d'une couche sphérique uniformément électrisée, la force électrique est nulle*; 2° *en tout point pris à l'extérieur, la force électrique est la même que si toute la masse électrique de cette couche était réunie au centre.* — Cette proposition, connue sous le nom de théorème de Newton, peut être présentée comme une conséquence immédiate du théorème de Gauss.

Remarquons d'abord d'une manière générale que, si l'on imagine une surface sphérique S, de rayon quelconque OP (*fig.* 443 ou 444), concentrique à la couche électrisée E, la force électrique F a toujours, par raison de symétrie, une même valeur en tous les points P de cette surface. Le flux de force relatif à cette surface fermée a donc pour expression $F \times 4\pi \overline{OP}^2$. Dès lors :

1° Si le point P est *à l'intérieur* de la couche électrisée E (*fig.* 445), il n'y a pas de masse électrique à l'intérieur de la surface fermée S ; donc, d'après le théorème de Gauss, le flux de force relatif à cette surface doit être identiquement nul, ce qui exige qu'on ait $F = 0$.

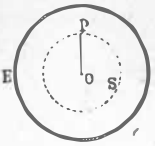


Fig. 445.

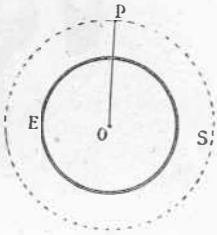


Fig. 444.

2° Si le point P est *à l'extérieur* de la couche électrisée E (*fig.* 444), la charge q, qui est répartie sur cette couche, étant à l'intérieur de la surface fermée S, le flux de force relatif à cette surface sphérique, de rayon OP, est égal à $q \times 4\pi$. On a donc, en égalant les deux expressions du flux de force,

$$F \times 4\pi . \overline{OP}^2 = q \times 4\pi, \quad \text{d'où} \quad F = \frac{q}{\overline{OP}^2} ;$$

c'est-à-dire que la force électrique au point P, extérieur à la couche sphérique électrisée, est *la même que si la charge q était au centre de la sphère.*

III. — DISTRIBUTION DE L'ÉLECTRICITÉ. — DÉPERDITION

652. L'électricité se porte à la surface des corps conducteurs. — Quand on électrise tels ou tels points d'un corps mauvais conducteur, l'électricité demeure localisée en ces points : il n'y a donc pas lieu d'étudier la distribution de l'électricité dans ces corps. — Il n'en est pas de même des corps conducteurs. Nous allons montrer d'abord que quand un corps conducteur est électrisé, *il n'y a d'électricité qu'à sa surface.*

Prenons une sphère métallique A (*fig.* 445), isolée par un pied de verre, et deux hémisphères creux B et C, qui peuvent s'appliquer exactement sur la sphère et qu'on maintient avec des manches isolants. Électrisons la sphère A, en la mettant en communication avec la machine électrique, et couvrons-la ensuite avec les hémisphères : en retirant les hémisphères, nous constaterons qu'ils sont électrisés, tandis que la sphère a perdu son électricité.

Prenons encore une sphère métallique creuse (*fig.* 446), percée d'une petite ouverture O : si l'on électrise cette sphère et qu'on touche l'un des points de la surface extérieure avec un petit disque de clinquant, ou

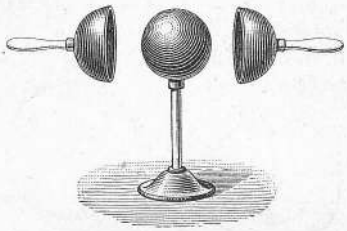


Fig. 445.

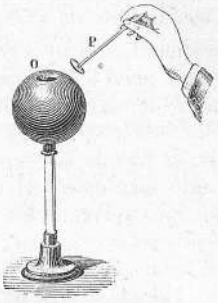


Fig. 446.

plan d'épreuve, isolé au bout d'une tige de gomme laque P, on constate que le disque se charge d'une quantité sensible d'électricité. Si l'on fait la même expérience pour un point intérieur, on ne constate pas trace d'électricité sur le plan d'épreuve.

Voici encore une expérience qui est due à Faraday. — On dispose, à l'intérieur et à l'extérieur d'une cage métallique, des couples de pendules, formés de balles de sureau suspendues par des fils conducteurs de lin. La cage étant placée sur un tabouret à pieds de verre, on la met en communication avec une machine électrique en activité : les pendules extérieurs divergent seuls ; les pendules intérieurs demeurent verticaux.

D'une manière générale, quand un conducteur électrisé est en équilibre, il n'y a pas d'électricité à l'intérieur du corps (*).

653. Distribution de l'électricité à la surface de conducteurs de diverses formes. — Densité électrique en un point. — La loi de Coulomb (641) suffit pour déterminer *a priori*, par le calcul, la distribution de l'électricité sur la surface d'un conducteur de forme déterminée : cette distribution doit toujours satisfaire aux deux conditions suivantes : 1° en tout point *intérieur*, la force électrique doit être nulle (648) ; 2° en tout point pris *sur la surface même du conducteur*, la force électrique doit être normale à la surface (649). — En appliquant le calcul à des formes simples de conducteurs, on a pu ensuite vérifier par des mesures expérimentales les résultats obtenus.

(*) Ce résultat se déduit immédiatement du théorème de Gauss. — En effet, si l'on imagine, *à l'intérieur d'un conducteur*, une surface fermée de forme quelconque, la force électrique est nulle en tous ses points (648), et par suite le flux de force total relatif à cette surface est nul ; dès lors, d'après le théorème de Gauss (650), la masse électrique comprise à l'intérieur de cette surface doit être nulle.

Pour définir avec précision la distribution de l'électricité sur la surface d'un conducteur, on convient d'appeler *densité électrique en un point*, la quantité d'électricité répartie sur un petit élément de surface pris autour de ce point, quantité rapportée à *l'unité de surface*; en sorte que, si l'on désigne par μ la densité ainsi définie, la charge de l'élément de surface s est $q = s\mu$. — Pour mesurer expérimentalement les densités électriques en divers points d'un conducteur, il suffit d'appliquer successivement un même *plan d'épreuve* sur ces points (*fig.* 447). A chaque contact, la surface extérieure du petit disque métallique N constitue, pour la région couverte, la surface du conducteur lui-même, en sorte que la charge qui se trouvait sur cette région passe sur le disque. Quand on retire le plan d'épreuve, il emporte sa charge, et l'on peut, en le plaçant dans la balance de Coulomb, obtenir une mesure de sa charge q. Le quotient de q par la surface s du disque est la mesure de la densité électrique μ au point touché.

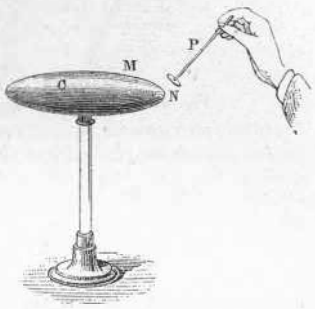


Fig. 447. — Étude de la distribution de l'électricité sur un corps conducteur.

Parmi les résultats obtenus par Coulomb, en appliquant cette méthode à des conducteurs de formes diverses, nous nous contenterons de citer les suivants :

Sur une *sphère*, la densité électrique est la même en tous les points de la surface; résultat évident *a priori*, par raison de symétrie.

Sur un *ellipsoïde*, les densités électriques aux extrémités des axes sont proportionnelles aux longueurs de ces axes.

Sur les deux surfaces d'un *disque circulaire*, la densité électrique est minimum au centre, et maximum vers la circonférence.

654. Expression de la force électrique en un point extérieur, voisin de la surface d'un conducteur, en fonction de la densité électrique sur le conducteur, au voisinage de ce point. — Théorème de Coulomb. — On a vu (649, *Rem.*) que, en tout point extérieur, voisin de la surface d'un conducteur en équilibre, la force électrique est *normale* à cette surface : la théorie montre que, si μ est la densité électrique sur le conducteur, *la force électrique, en un point extérieur voisin, a pour mesure le produit* $4\pi\mu$ (théorème de Coulomb).

Ce théorème peut se déduire très simplement du théorème de Gauss (650). — Prenons un point M (*fig.* 448) à l'extérieur du conducteur électrisé C, à une distance très petite, et faisons passer par ce point un élément de surface AB, parallèle à la surface du conducteur. Considérons une surface cylindrique, ayant ses génératrices perpendiculaires à AB, et ayant pour bases, d'une part AB, et d'autre part un élément parallèle A'B', pris symétriquement à l'intérieur

du corps conducteur : appliquons à cette surface fermée le théorème de Gauss. — Cette surface comprend, à son intérieur, la quantité d'électricité qui est répartie sur l'élément A″B″, découpé par la surface convexe du cylindre sur le conducteur électrisé : si μ est la densité électrique, cette quantité d'électricité est $\mu \times$ surf. A″B″ ; par suite, le flux de force *total*, relatif à cette surface fermée, est égal à $\mu \times$ surf. AB $\times 4\pi$. Mais, d'autre part, dans l'évaluation du flux de force total qui traverse cette surface, on n'a à tenir compte que des forces relatives à la surface AB, puisque la force électrique est nulle en tous les points de l'élément A′B′, intérieur au corps conducteur, et que, sur la surface convexe du cylindre, à l'extérieur du corps conducteur, les lignes de force sont dirigées suivant les génératrices : le flux de force total se réduit donc au terme relatif à AB, dont la valeur est F $\times$ surf. AB, en désignant par F la force électrique au point M. — En égalant les deux expressions du flux de force, on en déduit $F = 4\pi\mu$.

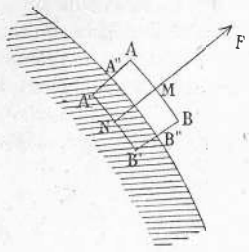


Fig. 448.

Remarque. — Quand μ est positif, la force électrique est dirigée vers l'extérieur de la surface du conducteur : elle doit être considérée comme *positive*. — Quand μ est négatif, la force électrique est dirigée vers l'intérieur ; elle doit être considérée comme *négative*.

655. Tension électrostatique. — On vient de voir que, en un point extérieur M (*fig.* 448), voisin de la surface d'un conducteur C électrisé positivement et en équilibre, la force électrique F est proportionnelle à la densité μ dans la région voisine. En un point de la surface même du conducteur, la force électrique, c'est-à-dire la force répulsive exercée *sur l'unité de masse électrique*, doit être également proportionnelle à μ. Mais sur l'élément A″B″ est répartie une masse électrique qui, par unité de surface, est égale à la même quantité μ. On conçoit donc que la répulsion exercée, sur la quantité d'électricité répartie sur l'unité de surface, doive être proportionnelle à μ^2. — La valeur de cette force répulsive, *par unité de surface* du conducteur, est ce qu'on appelle la *tension électrostatique*. On démontre qu'elle a pour mesure $2\pi\mu^2$ (*).

Pour le démontrer, remarquons que, au point M pris *à l'extérieur* du conducteur (*fig.* 448), la force électrique F doit être considérée comme la résultante de deux forces de même sens : l'une f, émanant de la charge de l'élément A″B″ ; l'autre f', émanant de tout le reste du conducteur : c'est cette somme $f + f'$ qui est égale à $4\pi\mu$ (654). — Au point N, symétrique de M, par

(*) Dans le cas d'un conducteur électrisé *négativement*, quoique la densité μ doive être considérée comme négative, l'expression de la tension électrostatique $2\pi\mu^2$ est encore positive. On conçoit qu'il en doit être ainsi : la charge négative de chaque élément doit être repoussée par la charge négative du reste du conducteur. Quel que soit le signe de μ, l'électricité de la surface du conducteur tend à fuir cette surface.

rapport à A″B″, et situé à l'*intérieur* du conducteur, la force émanant de la charge de l'élément A″B″ à une valeur égale et de signe contraire $-f$, tandis que la force émanant de la charge du reste du conducteur a encore la même valeur f', en raison de la petitesse de la distance MN. Or, en ce point N, la résultante $f' - f$ est nulle, puisque ce point est à l'intérieur du conducteur. Par suite, chacune des composantes f, f', est égale, en valeur absolue, à la moitié de la force électrique F au point M, c'est-à-dire à $2\pi\mu$.

Si maintenant on considère la charge électrique qui se trouve en A″B″ *sur la surface même du conducteur*, elle est soumise uniquement à la force émanant du reste du conducteur; c'est-à-dire que, sur cet élément, l'unité de masse électrique est soumise à une force répulsive égale à $2\pi\mu$. La masse de l'élément étant $\mu \times$ surf. A″B″, la force répulsive est $2\pi\mu^2 \times$ surf. A″B″. — Par suite, la force répulsive, pour l'unité de surface, ou *la tension électrostatique*, a pour valeur $2\pi\mu^2$.

656. Écoulement de l'électricité dans l'air. — Pouvoir des pointes. — Quand, au moyen d'une machine électrique, on électrise progressivement un conducteur isolé, il arrive un moment où la tension électrostatique acquiert, en certains points de la surface, une valeur capable de surmonter la résistance de l'air, et de produire un écoulement de l'électricité dans l'air ambiant.

Cet écoulement d'électricité est particulièrement manifeste à l'extrémité *d'une pointe*. En effet, d'après la loi de distribution sur un ellipsoïde (653), on peut prévoir que, si le grand axe s'allonge indéfiniment, c'est-à-dire si le conducteur se termine par une pointe, la densité électrique μ tend à devenir infinie en ce point; par suite, la tension électrostatique $2\pi\mu^2$, acquérant ainsi une très grande valeur à l'extrémité de la pointe, doit arriver à surmonter la résistance de l'air.

On fait ordinairement l'expérience en adaptant une pointe métallique sur l'un des conducteurs d'une machine électrique en activité. L'écoulement d'électricité se manifeste par une aigrette lumineuse, visible dans l'obscurité. — En outre, comme l'air environnant se charge alors de la même électricité que la pointe, il se produit une répulsion entre la pointe et l'air. En plaçant la main près de l'extrémité de la pointe, on sent un courant d'air très vif; si l'on présente la flamme d'une bougie à ce courant d'air (*fig.* 449), on le voit courber la flamme, et souvent l'éteindre.

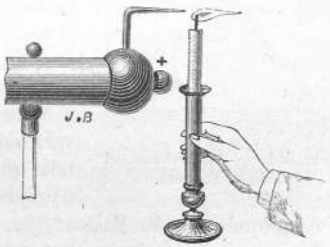


Fig. 449. — Écoulement de l'électricité par une pointe.

Si la pointe est mobile, et qu'elle puisse obéir à la force répulsive qui s'exerce entre elle et l'air électrisé, on la voit se mouvoir en sens inverse. Ce sont les conditions réalisées dans le *tourniquet électrique*.

— Cet appareil, représenté par la figure 450, se compose de plusieurs tiges métalliques horizontales, terminées par des pointes courbées toutes dans le même sens; le système de ces tiges est mobile sur un pivot métallique, qui est mis en communication avec la machine électrique. L'appareil se met en mouvement en sens inverse de la direction des pointes, c'est-à-dire dans le sens des flèches qu'indique la figure.

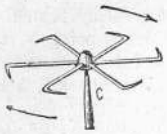


Fig. 450. — Tourniquet électrique.

Une conclusion à tirer de ce qui précède, c'est qu'on doit toujours éviter les pointes et les arêtes vives, dans les conducteurs sur lesquels on veut conserver l'électricité : on a soin de limiter ces appareils par des surfaces arrondies.

657. Notions générales sur la déperdition de l'électricité. — L'expérience montre qu'un conducteur électrisé, lors même qu'il ne présente aucune arête vive, et lors même qu'il est porté par un support isolant, ne peut jamais conserver indéfiniment sa charge : il éprouve une *déperdition* progressive.

Cette déperdition tient, comme l'a montré Coulomb, à plusieurs causes. — Et d'abord, il y a déperdition *par les supports* : le verre, la gomme laque, la résine, ne sont pas absolument dépourvus de conductibilité; la perte ne peut être considérée comme négligeable, que si les supports sont à la fois très longs et très fins, et si la charge est suffisamment faible. — Il y a toujours aussi déperdition *par l'air*, à cause du renouvellement de l'air à la surface du conducteur électrisé.

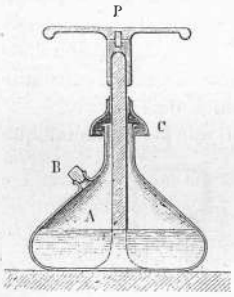


Fig. 451. — Support isolant de M. Mascart.

Mais la cause de déperdition la plus importante réside dans l'humidité qui se dépose à la surface des supports et qui conduit l'électricité dans le sol. Cet inconvénient se produit surtout avec les supports de verre : on y remédie ordinairement en recouvrant le verre d'une substance peu hygrométrique, telle que la gomme laque. — Il est préférable d'employer des supports dont la disposition a été indiquée par M. Mascart (*fig.* 451). Le pied de verre qui porte le plateau métallique P, ou tout autre conducteur que l'on veut isoler, est constamment desséché par de l'acide sulfurique A, placé dans le flacon qui l'entoure. L'ouverture du flacon est entourée d'un couvercle C en ébonite.

IV. — POTENTIEL ÉLECTRIQUE.

658. Rapprochements entre les phénomènes de l'électricité et ceux de l'hydrostatique ou de la chaleur. — Niveau électrique ou température électrique. — La définition précise du *potentiel électrique*, telle qu'elle sera donnée plus loin (659), repose sur la considération du travail électrique. Avant de donner cette définition et les conséquences qui en découlent, il ne sera pas inutile de présenter quelques considérations purement expérimentales sur les rapprochements que l'on peut établir entre les phénomènes de l'électricité et ceux de l'hydrostatique ou de la chaleur.

L'addition d'une certaine quantité d'électricité à un corps conducteur, soustrait à toute influence électrique, peut être considérée comme assimilable à l'addition d'une certaine quantité de liquide dans un réservoir : on peut dire qu'il se produit alors un accroissement du *niveau électrique* de ce corps. — Il ne pourra y avoir passage d'électricité, d'un conducteur à un autre, que s'il existe, entre ces deux conducteurs, une *différence de niveau électrique*.

En assimilant les phénomènes électriques aux phénomènes de la chaleur, on peut dire aussi que l'addition d'une certaine quantité d'électricité à un corps conducteur, soustrait à toute influence, donne naissance à un accroissement de la *température électrique* de ce corps. — Il ne pourra y avoir transmission d'électricité, d'un corps à un autre, que s'il existe entre eux une *différence de température électrique*.

Ces différences d'état électrique, assimilables à des différences de niveau ou à des différences de température, constituent ce que nous appellerons des *différences de potentiel*.

Voici enfin un fait expérimental, particulièrement digne de remarque. — Nous avons vu (653) qu'un même plan d'épreuve, mis successivement en contact avec les divers points d'un conducteur électrisé, de forme quelconque, acquiert généralement des charges différentes. Au contraire, si l'on relie successivement les divers points de ce conducteur, par l'intermédiaire d'un fil métallique fin, avec une petite sphère conductrice isolée, assez éloignée pour qu'elle ne puisse éprouver aucune action d'influence, on constate, une fois la communication interrompue, que la petite sphère a acquis toujours *une même charge*, quel que soit le point avec lequel la communication a été établie. — Cette petite sphère remplit donc ici le rôle d'une sorte de thermomètre : on peut dire qu'elle prend une certaine *température électrique*, qui est *la même pour tous les points du conducteur*. On verra plus loin (671) que la charge acquise alors par la sphère peut servir de mesure à ce que nous appellerons le *potentiel électrique* du conducteur.

659. Travail électrique. — Définition du potentiel électrique en un point du champ. — Considérons le champ électrique produit par un système de corps électrisés, placés dans une salle constituant une enceinte conductrice fermée, en communication avec le sol. Dans l'intérieur de cette enceinte, la force électrique en un point du champ ira en diminuant à mesure que le point considéré s'éloignera des corps électrisés; si tous les points de l'enceinte sont suffisamment éloignés de ces corps, la force électrique sera sensiblement nulle au voisinage des parois. D'ailleurs, en chaque point du champ, la force électrique ne sera pas modifiée par la présence de masses électriques qui pourraient exister à l'extérieur de l'enceinte (647, *Rem.*) : on pourra donc raisonner comme s'il n'y avait pas d'autres masses électriques que celles des corps placés à l'intérieur. — Le champ étant ainsi défini, imaginons qu'une masse électrique positive q se déplace dans ce champ, d'un point A à un point B (*fig.* 452), sans exercer aucune influence pour modifier l'état du champ : les forces électriques, agissant sur cette masse comme forces motrices ou comme forces résistantes, accomplissent un travail positif ou négatif. On démontre que le travail électrique est *indépendant du chemin suivi*, ACB ou ADB (*).

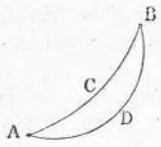


Fig. 452.

Soit V le travail électrique, positif ou négatif, évalué en ergs, qui correspondrait au déplacement de l'*unité de masse électrique positive*, depuis un point A pris dans le champ, jusqu'en un point quelconque X de l'enceinte ou du sol. Le même nombre V mesurerait encore le travail correspondant au déplacement de l'unité de masse électrique positive, du point A à un autre point Y du sol. En effet, la force électrique étant nulle en tous les points du conducteur constitué par l'enceinte et par le globe terrestre (648), le travail qui correspondrait à un déplacement de X en Y serait nul. — De là, la définition générale suivante :

Le potentiel électrique en un point A *a pour mesure, en grandeur et en*

(*) Cette proposition est une conséquence du principe fondamental de la conservation de l'énergie. — Soit T le travail, supposé positif ou moteur, qui correspond au chemin ACB, et soit T' le travail positif ou moteur qui correspond au chemin ADB; supposons pour un instant $T' < T$. — Effectuons d'abord le déplacement de la charge q suivant ACB; puis, ramenons-la au point A par le chemin BDA. Dans la première partie du parcours, la force électrique, motrice, donne lieu à un travail moteur T : on conçoit la possibilité d'emmagasiner ce travail, sous forme de force vive, dans les organes d'une machine. Dans la deuxième partie du parcours BDA, la force électrique étant résistante, il faudrait dépenser contre la force électrique un travail T'; la force vive des organes de la machine diminuerait d'autant. Une fois le cycle ACBDA parcouru, il resterait dans les organes de la machine une partie $T - T'$ de la force vive, qui serait disponible pour produire un travail extérieur équivalent. On pourrait indéfiniment faire déplacer la charge q suivant le même cycle, en produisant chaque fois un travail $T - T'$, sans dépense correspondante d'énergie. — Un pareil résultat est en contradiction avec le principe de la conservation de l'énergie : il faut donc que l'on ait $T =$ [illegible].

signe, le nombre V *qui mesurerait le travail électrique correspondant au déplacement de l'unité de masse électrique positive, depuis le point* A *jusqu'au sol.*

660. Expression du travail électrique pour un déplacement entre deux points déterminés, en fonction des potentiels en ces points. — Si V et V′ sont les potentiels en deux points quelconques A et A′ du champ, la *différence* V — V′ mesure, en grandeur et en signe, le travail accompli par les forces électriques, quand l'*unité de masse électrique positive* se déplace de A en A′. — En effet, supposons que l'unité de masse positive se déplace du point A jusqu'au sol, en passant par le point A′. Le travail électrique, qui est de V ergs, se compose de deux parties : 1° le travail T que l'on veut évaluer, et qui correspond au déplacement de A en A′; 2° le travail correspondant au déplacement de A′ au sol, qui est de V′ ergs. On a donc

$$V = T + V';$$

d'où

$$T = V - V'.$$

Remarque. — En particulier, si la force électrique est nulle dans la région de l'espace qui comprend les deux points A et A′, on a $T = o$, ou $V - V' = o$. Par conséquent, *le potentiel a une même valeur* V *en tous les points d'une région où la force électrique est nulle.*

661. Potentiel d'un conducteur en équilibre. — Quand un conducteur est en équilibre électrique, la force électrique est nulle en tout point pris à l'intérieur de ce conducteur (648); par suite, d'après ce qu'on vient de voir (660, *Rem.*), *tous les points pris à l'intérieur d'un conducteur en équilibre sont au même potentiel.*

Remarque. — Le globe terrestre étant un conducteur en équilibre électrique, tous ses points sont au même potentiel. Par suite, d'après la définition même du potentiel (659), *en tous les points du globe terrestre, la valeur du potentiel est zéro.*

662. Surfaces de niveau. — Expression de la force électrique en un point du champ. — On appelle *surface de niveau*, ou *surface équipotentielle*, le lieu géométrique des points du champ où le potentiel a une même valeur.

Dans le cas particulièrement simple d'une couche d'électricité positive répartie uniformément sur une *sphère* conductrice, les surfaces de niveau sont, par raison de symétrie, des surfaces sphériques concentriques, extérieures à la sphère électrisée. — Si maintenant on considère un conducteur unique électrisé, *de forme quelconque*, sa surface est une surface de niveau, caractérisée par la valeur commune du potentiel en tous ses points. A mesure qu'on s'éloigne de cette surface, les surfaces de niveau qui l'entourent, et qui sont caractérisées par des potentiels différents, conservent d'abord une forme voisine de la

sienne; mais elles se déforment ensuite progressivement, et, quand le potentiel qui les caractérise se rapproche de zéro, elles tendent vers des surfaces sphériques concentriques, de très grands rayons.

Quand on connaît les surfaces de niveau dans une région du champ, et les valeurs du potentiel pour chacune de ces surfaces, on en peut déduire la *direction*, le *sens* et la *grandeur* de la force électrique en chaque point du champ. — Remarquons d'abord que, à un déplacement quelconque de l'unité de masse électrique sur une même surface de niveau, correspond toujours un travail nul, puisque la valeur du potentiel n'a pas varié (660); d'autre part, le travail électrique ne peut être nul, pour une valeur quelconque d'un pareil déplacement, que si la force électrique est constamment normale à la direction du déplacement; donc, en tout point d'une surface de niveau, la force électrique est *dirigée normalement à cette surface.* — Soit S_1 (*fig.* 453) une surface de niveau, caractérisée par un potentiel V_1, et soit F_1 la force électrique en un point A_1 de cette surface : si l'on suppose que l'unité de masse électrique positive se déplace *dans le sens de la force* F_1, depuis le point A_1 jusqu'au point A_2 où la direction de la force rencontre la surface S_2 caractérisée par le potentiel V_2, le travail *positif* qui correspond à ce déplacement a pour mesure $A_1A_2 \times F_1$; il a aussi pour valeur $V_1 - V_2$ (660). La différence $V_1 - V_2$ est donc nécessairement positive, c'est-à-dire que, dans un champ électrique, le *sens* de la force électrique est toujours *celui dans lequel la valeur du potentiel va en diminuant.* — Enfin, en égalant les deux expressions du travail, on en déduit la *valeur* de la force électrique,

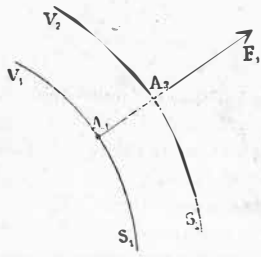


Fig. 453.

$$F_1 = \frac{V_1 - V_2}{A_1A_2}.$$

On peut imaginer que l'on ait figuré les surfaces de niveau caractérisées par des potentiels décroissant progressivement d'une quantité constante, par exemple d'une unité, de sorte que l'on ait

$$V_1 - V_2 = V_2 - V_3 = \ldots = 1.$$

Au point A_1, la valeur de la force électrique que nous venons d'obtenir devient alors $F_1 = \frac{1}{A_1A_2}$; elle est d'autant plus grande que la distance A_1A_2 est plus petite. Donc, dans une région déterminée du champ, *la force électrique est d'autant plus grande que les surfaces de niveau correspondantes à une même variation du potentiel y sont plus rapprochées.*

Remarque. — Si, pour une raison quelconque, le potentiel en tous

les points d'un champ vient à augmenter d'une même quantité U, les surfaces de niveau conservent leurs formes respectives; la force électrique en un point A_1, exprimée par $\frac{(V_1 + U) - (V_2 + U)}{A_1A_2}$, conserve la même valeur $\frac{V_1 - V_2}{A_1A_2}$. Or les phénomènes électriques que l'on peut observer dépendent des valeurs des forces électriques aux divers points du champ; ces phénomènes ne sont donc pas modifiés par un même accroissement du potentiel en chaque point: ils ne dépendent que des *différences de potentiel.*

Nous allons montrer maintenant comment on peut évaluer le potentiel en un point du champ, quand on connaît les masses électriques réparties aux divers points électrisés.

663. Potentiel en un point d'un champ produit par un élément unique électrisé. — Considérons le champ électrique le plus simple, celui qui serait produit par un *élément électrisé*, se réduisant sensiblement à un point O, et soit q la charge de cet élément. — Toutes les lignes de force du champ seront dirigées suivant des droites passant par O. Considérons deux points A et A_1 (*fig.* 454), situés sur l'une de ces droites OX, et assez rapprochés l'un de l'autre pour que les deux valeurs de la force électrique $\frac{q}{OA^2}$ et $\frac{q}{OA_1^2}$ ne diffèrent pas sensiblement de la valeur moyenne $\frac{q}{OA \times OA_1}$.

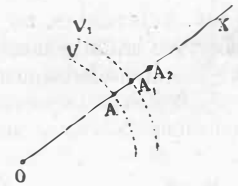


Fig. 454.

Si V et V_1 sont les potentiels en A et A_1, au déplacement de l'unité de masse électrique positive suivant AA_1, correspondrait un travail $V - V_1$ (660); ce travail aurait aussi pour mesure le produit du déplacement AA_1 par la grandeur moyenne de la force $\frac{q}{OA \times OA_1}$, c'est-à-dire $\frac{q \times AA_1}{OA \times OA_1}$ ou $q\,\frac{OA_1 - OA}{OA \times OA_1}$, ou enfin $q\left(\frac{1}{OA} - \frac{1}{OA_1}\right)$. On a donc :

$$V - V_1 = q\left(\frac{1}{OA} - \frac{1}{OA_1}\right).$$

On aurait de même, en désignant par V_2, V_3, ... V_{n-1}, V_n, les valeurs des potentiels aux points A_2, A_3, ... A_{n-1}, A_n,

$$V_1 - V_2 = q\left(\frac{1}{OA_1} - \frac{1}{OA_2}\right)$$

$$V_2 - V_3 = q\left(\frac{1}{OA_2} - \frac{1}{OA_3}\right)$$

.....

$$V_{n-1} - V_n = q\left(\frac{1}{OA_{n-1}} - \frac{1}{OA_n}\right).$$

En additionnant toutes ces égalités membre à membre, il vient

$$V - V_n = q\left(\frac{1}{OA} - \frac{1}{OA_n}\right).$$

Or, quand le point A_n se rapproche du sol, ou des parois de l'enceinte communiquant avec le sol, on voit que, d'une part, le terme $\frac{1}{OA_n}$ tend vers zéro; d'autre part, le potentiel V_n tend également vers zéro; à la limite, l'égalité précédente peut s'écrire

$$V = \frac{q}{OA}.$$

Donc, *dans un champ produit par un élément unique, chargé d'une quantité d'électricité q, le potentiel à une distance x de cet élément est exprimé, en grandeur et en signe, par* $V = \frac{q}{x}$.

664. Potentiel en un point d'un champ produit par une couche sphérique uniformément électrisée. — Lorsqu'une quantité d'électricité Q est uniformément distribuée sur une *couche sphérique* de rayon R (soit à la surface d'une sphère conductrice pleine, soit sur une mince enveloppe conductrice, de forme sphérique), on sait que l'action de cette couche sphérique sur un point extérieur quelconque est la même que si toute la charge Q était accumulée au centre (651, 2°). — On est ainsi ramené au cas précédent (663), c'est-à-dire que, en tout point *extérieur*, situé à une distance x du centre, la valeur du potentiel est $\frac{Q}{x}$.

En particulier, si $x = R$, c'est-à-dire si le point est pris *sur la surface même* de la sphère, la valeur du potentiel est $V = \frac{Q}{R}$.

En tout point pris *à l'intérieur* de la sphère, le potentiel conserve cette même valeur $\frac{Q}{R}$, puisque la force électrique en ces points est nulle (651, 1°), et que, par suite, le potentiel conserve une valeur constante (660, *Rem.*).

665. Potentiel en un point d'un champ produit par un système quelconque de corps électrisés. — Quels que soient les corps électrisés (conducteurs ou non) qui produisent le champ, on peut toujours les considérer comme composés d'éléments dont les charges sont respectivement q, q', q''... et dont les distances à un point déterminé A du

champ sont respectivement x, x', x''.... Si l'on suppose que l'unité de masse électrique positive se déplace du point A jusqu'au sol, les travaux des forces électriques élémentaires, dues à chacun des éléments électrisés, sont respectivement $\frac{q}{x}$, $\frac{q'}{x'}$, $\frac{q''}{x''}$; et le travail électrique total, c'est-à-dire le potentiel au point A, est égal à la somme algébrique des travaux élémentaires. On a donc :

$$V = \frac{q}{x} + \frac{q'}{x'} + \frac{q''}{x''} + \cdots \quad \text{ou} \quad V = \sum \frac{q}{x} (*).$$

666. Capacité électrique d'un conducteur, dans des conditions déterminées. — Si l'on considère un système déterminé de conducteurs électrisés, occupant à proximité les uns des autres des positions déterminées, et en équilibre électrique, le potentiel a, pour chacun d'eux, une valeur déterminée, la même en tous les points d'un même conducteur (661), mais différente d'un conducteur à un autre. — Imaginons qu'on vienne à doubler ou tripler les masses électriques $q, q', q'', \ldots$ réparties sur les divers éléments de surface de chacun d'eux. En un point quelconque, la valeur du potentiel, définie par l'expression $V = \frac{q}{x} + \frac{q'}{x'} + \frac{q''}{x''} + \cdots$ deviendra double ou triple de ce qu'elle était primitivement; l'équilibre subsistera d'ailleurs entre ces nouvelles charges, puisque, dans toute l'étendue de chaque conducteur, le potentiel sera encore constant, et, par suite, la force électrique sera nulle. — Donc, si l'on considère l'un des conducteurs en particulier, on peut dire que, dans les divers états d'équilibre que l'on peut réaliser en faisant varier

(*) Le potentiel *absolu* en un point doit être considéré comme défini par la somme $\sum \frac{q}{x}$, dans laquelle on ferait intervenir, non seulement les masses électriques placées à l'intérieur de l'enceinte dont les parois conductrices reliées au sol limitent le champ étudié, mais encore les masses électriques extérieures à l'enceinte. — Ainsi défini, le potentiel absolu serait la mesure du travail électrique qui correspondrait au déplacement de l'unité d'électricité positive, depuis le point considéré jusqu'à l'infini. Dans la région de l'espace infiniment éloignée de toutes les masses agissantes, le potentiel absolu serait zéro.

En un point quelconque du champ étudié, la valeur du potentiel absolu comprendrait deux sommes de termes : l'une V, relative aux masses intérieures, n'est autre que la valeur du potentiel tel qu'il a été défini (659); l'autre U, relative aux masses extérieures inconnues, a la même valeur pour tous les points du champ, mais cette valeur est inconnue. — En un point du sol, la première somme étant nulle, la valeur du potentiel absolu du sol serait simplement représenté par U.

On ne connaît donc jamais les potentiels absolus V + U des divers points du champ; mais les *différences de potentiel*, qui interviennent seules dans les phénomènes électriques (662. *Rem.*), sont accessibles aux mesures.

On peut donc toujours considérer un potentiel comme caractérisé par l'excès V, positif ou négatif, de ce potentiel sur celui du sol, choisi comme *zéro* de potentiel, de même qu'une température est définie par l'excès positif ou négatif de cette température sur celle de la glace fondante, choisie comme zéro de température.

conducteur unique constitué par les deux conducteurs et le fil de communication. Les charges respectives des deux conducteurs sont alors CV_1 et $C'V_1$. Si l'on a égard à ce que la quantité d'électricité répartie sur le fil est négligeable, on a, en exprimant que la charge totale n'a pas varié,

$$CV + C'V' = CV_1 + C'V_1,$$

d'où l'on déduit

$$V_1 = \frac{CV + C'V'}{C + C'}.$$

En particulier, si le second conducteur était primitivement *à l'état neutre*, l'expression du potentiel final serait $V_1 = V\,\frac{C}{C + C'}$.

Si les deux conducteurs étaient primitivement *au même potentiel* V, le potentiel final aurait la même valeur $V_1 = V$; c'est-à-dire que, après l'établissement de la communication, chacun des conducteurs conserverait sa charge initiale.

Enfin, dans le cas général où les deux conducteurs sont, primitivement à des potentiels inégaux, si l'on suppose $V > V'$, on voit que, après la communication, une fois le nouvel état d'équilibre établi, la charge du premier conducteur a diminué de $CV - CV_1$; celle du second conducteur s'est accrue d'une quantité égale $C'V_1 - C'V'$. Il y a donc eu passage d'électricité positive, du conducteur qui était au potentiel le plus élevé sur le conducteur qui était au potentiel le moins élevé, jusqu'à ce que le potentiel ait pris sur les deux conducteurs une même valeur intermédiaire. — Ce phénomène électrique peut donc être assimilé, d'une manière plus précise que nous ne l'avions fait précédemment (658), soit à l'écoulement qui se produit quand on fait communiquer deux réservoirs contenant un même liquide à des niveaux différents, soit à l'échange de chaleur qui a lieu quand on met en contact deux corps à des températures différentes.

671. Mesure expérimentale des potentiels. — Principe de la méthode. — Pour mesurer le potentiel V d'un conducteur électrisé, de capacité C, il suffira de le mettre en communication, par un fil métallique fin et long, avec un conducteur de *très petite capacité* C', préalablement à l'état neutre; par exemple, avec une sphère métallique de très petit rayon. — Une fois l'équilibre établi, le potentiel commun au conducteur et à la sphère, $V_1 = V\,\frac{C}{C + C'}$, ne diffère pas sensiblement de V, puisqu'on suppose C' négligeable par rapport à C. Donc, si l'on connaît C', la charge prise par la sphère $Q' = C'V_1$, ou sensiblement $Q' = C'V$, peut servir à mesurer le potentiel V du conducteur, tel qu'il a été défini par le travail électrique (659). — C'est, en définitive, l'expérience à laquelle il avait été fait allusion (658).

En particulier, si l'on opérait avec une sphère d'un centimètre de rayon, on aurait $C' = 1$: alors, la charge Q' étant évaluée en unités électrostatiques C.G.S., sa valeur numérique exprimerait aussi le potentiel V du conducteur, en unités électrostatiques C.G.S.

672. Mesure des capacités électriques. — Principe de la méthode. — Pour mesurer la capacité C d'un conducteur, le principe de la méthode consiste à l'électriser d'abord à un certain potentiel V, que l'on mesure comme il vient d'être dit. On le met ensuite en communication, par un fil métallique fin et long, avec un autre conducteur, préalablement à l'état neutre, et dont la capacité C′ est connue (par exemple, avec un étalon de capacité) : la charge primitive du premier conducteur se partage alors entre les deux conducteurs, jusqu'à ce qu'ils arrivent à un même potentiel V_1, que l'on mesure encore. On a alors $V_1 = V\frac{C}{C + C'}$; d'où l'on tire

$$C = C'\frac{V_1}{V - V_1}.$$

673. Déformation des surfaces de niveau, quand on introduit un conducteur dans le champ électrique. — Interprétation des phénomènes d'influence. — Lorsqu'on introduit un conducteur S dans le champ d'un système de corps électrisés, les surfaces de niveau primitives doivent subir une *déformation*, puisque les points de l'espace qui sont occupés alors par le conducteur, et qui étaient antérieurement à des potentiels différents, doivent se mettre au même potentiel. — Dans certains cas particulièrement simples, on peut déterminer, par le calcul, la forme que prennent les nouvelles surfaces de niveau.

La figure 455 représente, en traits pleins, à l'échelle de $\frac{1}{10}$, les sections méridiennes des surfaces de niveau, primitivement sphériques (celles-ci figurées en traits ponctués), lorsqu'on introduit, dans le champ d'une très petite sphère A, chargée de 200 unités d'électricité positive, une sphère conductrice S de 20^{cm} de diamètre, dont le centre est placé à 50^{cm} du point A (*). On remarquera que, une fois le nouvel état d'équilibre établi, les surfaces de niveau correspondantes aux potentiels 6, 5, 3, se sont écartées de part et d'autre du conducteur S; la surface de potentiel 4, qui passait primitivement par le centre S, s'est déplacée vers la gauche et s'est dédoublée pour s'appliquer sur les deux régions opposées B et C de la surface du conducteur sphérique. — L'examen de la figure va nous permettre d'interpréter toutes les particularités que nous avons constatées dans les phénomènes d'influence (635).

Voyons d'abord comment varie la force électrique, aux différents points de la surface du conducteur S (662). En un point de la région C, la force électrique, normale à la surface de niveau 4, est dirigée *vers l'extérieur* du conducteur, de la surface 4 à la surface 3, dans le sens où le potentiel va en diminuant; en un point de la région B, la force est dirigée *vers l'intérieur* de S, de la surface 5 à la surface 4. Les surfaces 5 et 4 étant plus rapprochées que

(*) La figure représenterait aussi, en véritable grandeur, les sections méridiennes des surfaces de niveau, si l'on supposait le point A chargé de 20 unités d'électricité positive.

ne le sont les surfaces 4 et 3, la force électrique en un point de la région B est plus grande qu'au point correspondant de la région C; en tout point D, où la surface de niveau 4 présente trois nappes, DE, DB, DC, il est impossible que la force électrique soit à la fois normale à ces trois nappes; donc, en ce point D, la force électrique est *nulle*. — La force électrique étant ainsi déterminée en chaque point de la surface S, on en peut déduire la loi de distribu-

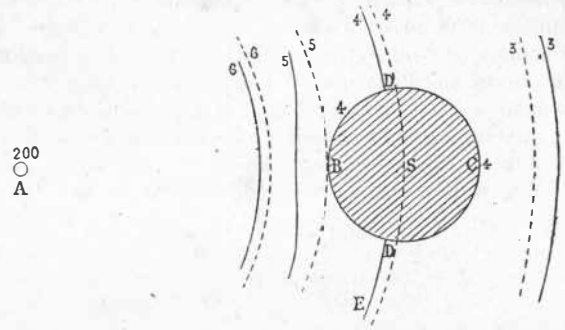


Fig. 455.

tion de l'électricité (654. *Rem.*). On sait en effet que la densité électrique, en chaque point de la surface d'un conducteur, est proportionnelle à la force électrique; elle est positive ou négative, suivant que la force est dirigée à l'extérieur ou à l'intérieur. Les régions C et B, séparées par la ligne neutre D, sont donc électrisées, l'une *positivement*, l'autre *négativement*; mais, en chaque point de la région B, la densité négative doit être, en valeur absolue plus grande que la densité positive au point correspondant de la région C. Les *quantités d'électricité* développées par influence sont néanmoins *égales*, la région positive C ayant une étendue plus grande que la région négative B. Tous ces faits ont été constatés par l'expérience (635).

La tension électrostatique, proportionnelle au carré de la densité (655), est, en un point de la région B, plus grande que la tension électrostatique au point correspondant de la région C. L'excès des tensions électrostatiques aux divers points de B, sur les tensions aux divers points de C, tend donc à *déplacer le conducteur influencé* S vers le corps influent. — C'est ce que l'on observe lorsque le conducteur influencé est une balle de sureau isolée par un fil de soie (638, *fig.* 434).

Avant l'introduction du conducteur S dans le champ de la sphère conductrice électrisée A, la distribution de l'électricité sur cette sphère était uniforme. Dans l'état d'équilibre représenté par la figure 455, il n'en est plus ainsi : les surfaces de niveau 4, 5, 6...., qui occupaient primitivement l'espace SA, se sont resserrées dans un espace plus petit BA; la force électrique, et par conséquent la densité électrique, ont donc *augmenté* aux points du conducteur A qui sont les plus voisins du conducteur influencé. — On le constaterait en répétant l'expérience que représente la figure 431, et en touchant successivement divers points de la sphère avec un plan d'épreuve : en un point de la sphère voisin du conducteur influencé, le plan d'épreuve prendrait une charge plus grande qu'au point diamétralement opposé.

Si le conducteur influent était mobile, la résultante des tensions électrosta-

tiques en tous les points de sa surface tendrait à le déplacer vers le conducteur influencé supposé fixe. — C'est ce que l'on constate en présentant à un corps conducteur un pendule isolé, chargé d'une électricité quelconque : on observe une attraction.

674. Cas où le conducteur induit est mis en communication avec le sol. — Aprés que le conducteur influencé a été mis en communication avec le sol, la déformation des surfaces de niveau est beaucoup plus prononcée (*fig.* 456). La surface du conducteur sphérique S est au potentiel 0; les sur-

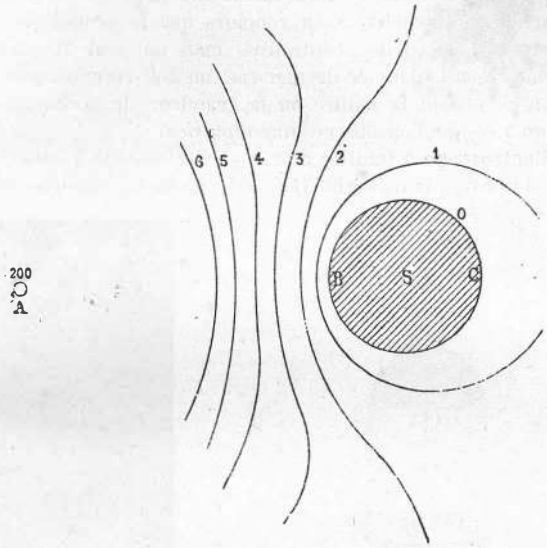


Fig. 456.

faces 1, 2, 3, 4, 5, 6.... se resserrent dans la région de l'espace BA. — Puisque, en tous les points de la surface de S, la force est dirigée vers l'intérieur, de la surface 1 à la surface 0, la densité y doit être négative. A une charge inductrice positive de 200 unités, correspondrait, sur le conducteur sphérique BC relié au sol, une charge induite négative de 40 unités. — Du reste, en chaque point de la région B, la densité négative a acquis, aprés la communication avec le sol, une plus grande valeur absolue, puisque, dans l'espace AB, les surfaces de niveau sont plus resserrées sur la figure 456 que sur la figure 455. — Tous ces faits ont été constatés par l'expérience (636).

V. — ÉLECTROSCOPES. — ÉLECTROMÈTRES.

675. Électroscopes. — Emploi du pendule électrique comme électroscope. — On donne le nom général d'*électroscopes* aux appareils

qui servent : 1° à reconnaître si un corps est électrisé ; 2° à déterminer la nature de son électricité.

De tous les électroscopes, le pendule électrique est le plus simple. — Pour reconnaître si un corps est électrisé, on l'approche d'un pendule à l'état neutre : s'il y a attraction, c'est que le corps est électrisé. — Pour déterminer la nature de cette électricité, on charge le pendule *d'une électricité connue*, et on lui présente le corps : s'il y a répulsion, c'est que le corps est chargé de la même électricité que le pendule ; s'il y a attraction, on est porté à en conclure que le pendule et le corps sont chargés d'électricités contraires, mais on peut être induit en erreur (638, *Rem.*). Dans ce dernier cas, on doit recommencer l'expérience, en changeant la nature ou la grandeur de la charge du pendule, jusqu'à ce que l'on observe une *répulsion*.

676. Électroscope à feuilles d'or. — L'électroscope à feuilles d'or se compose d'une tige de métal BB′ (*fig.* 457), portant à sa partie inférieure

Fig. 457. — Électroscope à feuilles d'or.

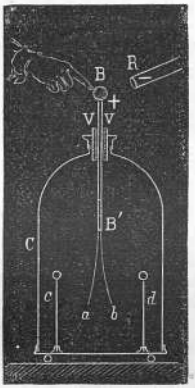


Fig. 458.

deux feuilles d'or *a*,*b*. Cette tige est fixée dans la tubulure d'une cloche de verre C, couverte d'un vernis isolant, et placée sur un plateau métallique : deux colonnes métalliques *c*, *d* sont fixées sur le plateau, en regard des feuilles d'or. L'air intérieur est maintenu sec, par des fragments de chlorure de calcium.

Si, l'instrument étant à l'état neutre, on approche de la boule B un corps électrisé, on observe une divergence des feuilles. On comprend, en effet, qu'il y a dans la tige développement d'électricité par influence : l'électricité repoussée par le corps s'accumule dans les feuilles, et détermine entre elles une répulsion. En outre, les feuilles elles-mêmes, agissant par influence sur les colonnes métalliques *c*, *d*, sont attirées par elles, et la sensibilité de l'instrument est ainsi augmentée. — Si

l'on éloigne le corps, la divergence cesse; l'expérience ainsi faite sert donc uniquement à constater *que le corps était électrisé*.

Pour savoir de *quelle électricité* un corps est chargé, on charge préalablement l'électroscope d'une *électricité connue*. Pour cela, on en approche, par exemple, un bâton de résine électrisé négativement, et l'on touche du doigt le bouton B (*fig.* 458); l'électricité positive de la tige et des feuilles d'or, attirée par la résine, est maintenue en B, tandis que l'électricité négative est repoussée dans le sol. Pendant cette opération, les feuilles d'or demeurent verticales; mais si l'on enlève le doigt, et qu'on éloigne ensuite le bâton de résine, les feuilles divergent, parce qu'une partie de l'électricité positive, primitivement retenue en B, se répand sur elles : l'instrument reste ainsi chargé d'électricité positive, c'est-à-dire d'une électricité *contraire à celle du corps qu'on a employé pour le charger*.

L'électroscope étant ainsi chargé d'une électricité connue, et, dans le cas actuel, d'électricité positive, on approche *lentement* de la boule B le corps qui est l'objet de l'expérience. — S'il détermine un rapprochement des feuilles, c'est qu'il attire une partie de leur électricité dans la boule; on en conclut qu'il est chargé d'électricité négative. — S'il augmente la divergence, c'est qu'il repousse dans les feuilles une partie de l'électricité répandue sur la tige; on est conduit à en conclure qu'il est chargé d'électricité positive.

Remarque. — Il est essentiel de remarquer que la conclusion ne présente pas la même certitude dans les deux cas. — Supposons, en effet, qu'en approchant lentement le corps, on ait vu diminuer la divergence des feuilles; en continuant à l'approcher progressivement, on verra les feuilles arriver au contact, puis diverger de nouveau, et de plus en plus fortement, à cause de la décomposition de l'électricité neutre de la tige, sous l'influence du corps qu'on lui présente. Dès lors, si l'on avait approché le corps trop brusquement, il aurait pu se faire qu'on n'observât que la divergence, et qu'on fût induit en erreur sur la nature de l'électricité du corps. On ne peut donc pas conclure avec certitude, d'après l'observation d'une *divergence seule* : il est préférable de charger l'électroscope d'une électricité contraire, et de faire la contre-épreuve — Enfin, l'observation d'*un rapprochement seul* ne peut pas non plus être concluante; car, si le corps soumis à l'expérience était à l'état naturel, il produirait aussi ce même résultat.

En résumé, il n'est permis de regarder la conclusion comme certaine, que si elle a été fournie par *un rapprochement observé, suivi d'une divergence*; ce résultat peut toujours être obtenu, en choisissant convenablement la source qui sert à charger l'électroscope.

677. Mesure des charges électriques. — Si l'on veut transformer l'électroscope à feuilles d'or en un *électromètre* servant à mesurer la charge d'un conducteur, il suffira, comme dans l'expérience de Faraday

(*fig.* 437), de mettre la boule de l'électroscope en communication avec un cylindre métallique creux, convenablement isolé, dans lequel on introduira, à une profondeur suffisante, le corps dont on doit mesurer la charge. La charge induite sur la surface extérieure du cylindre et sur les feuilles d'or est alors égale à la charge du corps inducteur (640). — Tant que la divergence des feuilles n'est pas très grande, on peut considérer la charge induite, et par conséquent la charge du corps soumis à l'expérience, comme proportionnelle à l'angle d'écart. Pour mesurer cet angle, au moins approximativement, on peut disposer, derrière les feuilles d'or, un cadran divisé.

678. Mesure des potentiels. — Electromètre à quadrants. — On donne plus particulièrement le nom d'*électromètres*, aux appareils qui servent à mesurer les *potentiels* des corps électrisés.

La balance de Coulomb pourrait servir d'électromètre. — Sir W. Thomson a imaginé un appareil fondé sur un principe analogue, auquel il a donné le nom d'*électromètre absolu*, qui permet de déterminer, en unités C.G.S., la valeur du potentiel d'un conducteur (*).

Nous nous contenterons de montrer ici comment on peut déterminer le *rapport des potentiels* de deux corps électrisés, au moyen d'un appareil qui a été également imaginé par sir W. Thomson, et qui a reçu le nom d'*électromètre à quadrants*. — La figure 459 représente cet appareil, sous la forme que lui a donnée M. Mascart.

Une plaque mince d'aluminium *mn* (*fig.* 460), taillée en forme de 8, est suspendue par deux fils de cocon, dont les extrémités F s'enroulent sur un treuil D (*fig.* 459). Cette plaque est disposée horizontalement à l'intérieur d'une sorte de boîte formée par quatre quadrants *a*, *b*, *a'*, *b'*, fixés par quatre tiges isolantes à la base supérieure du cylindre métallique qui renferme l'appareil. Les quadrants *a* et *a'* sont reliés, par des fils de cuivre couverts de soie, avec un bouton métallique isolé A ; les quadrants *b* et *b'* sont de même reliés au bouton B, par un autre fil qui ne touche pas le premier.

Dans le procédé de mesure le plus habituellement employé, on porte les deux paires de quadrants à des potentiels égaux et de signes contraires $+ V_1$ et $- V_1$, en mettant respectivement en communication les deux boutons A et B avec les deux pôles d'une pile constante, dont l'élément du milieu est relié au sol (Note de la page 608). — Une troisième borne métallique isolée C communique avec la plaque mobile, par l'intermédiaire du fil métallique E qui est attaché à cette borne, et du fil métallique G qui est fixé à la plaque ; ces fils plongent tous deux dans une capsule H contenant de l'acide sulfurique.

Pour comparer entre eux les potentiels de divers conducteurs, on les

(*) On trouvera, dans les problèmes placés à la fin du volume, quelques développements sur l'emploi de la balance de Coulomb pour la mesure des potentiels et pour la mesure des charges, et aussi sur le principe de l'électromètre absolu.

met successivement en communication, par un fil métallique long et fin, avec la borne C. Selon que chacun de ces potentiels est positif ou négatif, la charge acquise par la plaque *mn* est positive ou négative, et par suite la plaque est repoussée ou attirée par celui des groupes de secteurs qui est chargé positivement. On mesure la déviation par la méthode précédemment indiquée (478), en observant de loin, avec une lunette, les divisions d'une règle vues dans le miroir M (*). — Or la théorie montre que, lorsque l'équilibre est établi, la torsion imprimée au système *bifilaire* qui supporte la plaque, *est proportionnelle au potentiel* V du conducteur avec lequel la plaque est en communication. On prendra donc, pour

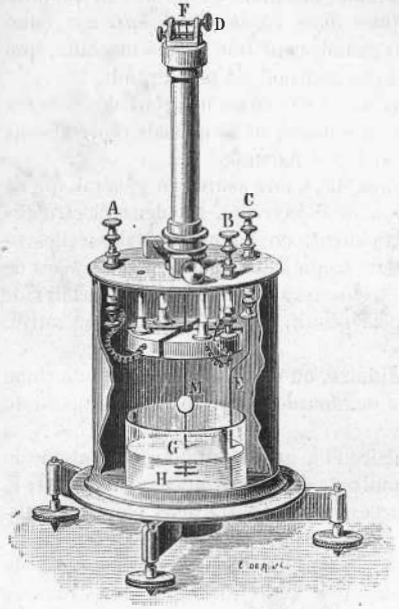


Fig. 459.

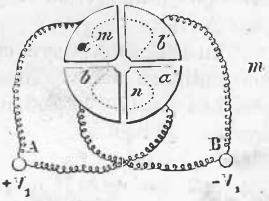


Fig. 460.

rapport numérique des potentiels, le rapport des angles de déviation.

Si l'on connaît, une fois pour toutes, la déviation qui correspond, pour l'instrument, à un potentiel d'un volt par exemple, on pourra obtenir, en volts, la valeur même des potentiels des conducteurs soumis à l'expérience.

VI. — MACHINES ÉLECTRIQUES.

679. Sources électriques. — On appelle *source électrique*, un système de corps capable de produire de l'électricité, de manière à arriver à un potentiel déterminé, et capable, en même temps, de reproduire

(*) Le fil métallique G porte des lames transversales, qui plongent dans l'acide sulfurique, et qui servent à amortir les oscillations.

l'électricité qui pourra lui être enlevée, de manière à se rétablir toujours au même potentiel.

Dans les *machines électriques*, que nous allons étudier dans ce chapitre, la reproduction de l'électricité ne se fait pas instantanément : elle exige une dépense successive de travail, consommé pour produire le mouvement de la machine. — Le *débit* d'une machine, c'est-à-dire *la quantité d'électricité qu'elle peut reproduire dans l'unité de temps*, est donc limité; le débit est d'autant plus grand, pour une même machine, que la vitesse du mouvement qui lui est imprimé est plus grande.

Les *piles*, que nous étudierons plus loin (chap. III), sont des sources électriques plus parfaites que les machines, en ce qu'elles reproduisent instantanément l'électricité qu'on leur emprunte.

Il est essentiel de remarquer que, dans une source en général, quelle que soit la cause de la production de l'électricité, les deux électricités se développent toujours simultanément, en quantités égales; elles se portent dans deux régions distinctes, que nous appellerons les *pôles* de la source. — Toute source électrique sera donc capable de débiter de l'électricité positive, par son pôle positif, et de l'électricité négative, par son pôle négatif.

680. Machine électrique ordinaire, ou de Ramsden. — La machine électrique ordinaire, ou *machine de Ramsden* (*fig.* 461), se compose de deux parties :

1° Un plateau de verre circulaire PP′, qu'on fait tourner autour de son centre au moyen d'une manivelle G : pendant ce mouvement, le plateau s'électrise en passant successivement entre deux paires de coussins fixes, BB, B′B′.

2° Des cylindres métalliques, C,C′, qui sont isolés par des pieds de verre, et qui constituent le *collecteur* de la machine; ces cylindres portent, à leurs extrémités voisines du plateau, deux fers à cheval métalliques, ou *mâchoires*, F, F′, qui embrassent le plateau, et qui sont garnis de pointes tournées du côté du verre. — Pendant le mouvement, le collecteur s'électrise par l'*influence* du plateau de verre, comme nous allons le montrer.

Considérons, pendant la rotation, les points du plateau qui viennent de franchir l'une des paires de coussins : ils sont chargés d'électricité positive. Lorsqu'ils arrivent entre les branches du fer à cheval suivant, ils donnent lieu, en tout point du collecteur, à une force électrique dont la direction générale est FC, F′C′. L'équilibre ne peut donc pas exister : l'électricité neutre du collecteur est décomposée; il apparaît de l'électricité positive dans la région du collecteur qui est la plus éloignée du plateau, et de l'électricité négative dans les fers à cheval F et F′, où cette électricité s'écoule par les pointes, en donnant lieu à une lueur violacée, visible dans l'obscurité. — De là résulte : 1° que le collecteur se charge d'électricité *positive*; 2° que les points du plateau qui ont

franchi les fers à cheval sont ramenés à l'état neutre. — Ces mêmes points, en passant dans la paire suivante de coussins, s'électrisent de nouveau, et ainsi de suite.

La chaine métallique M sert à conduire dans le sol l'électricité néga-

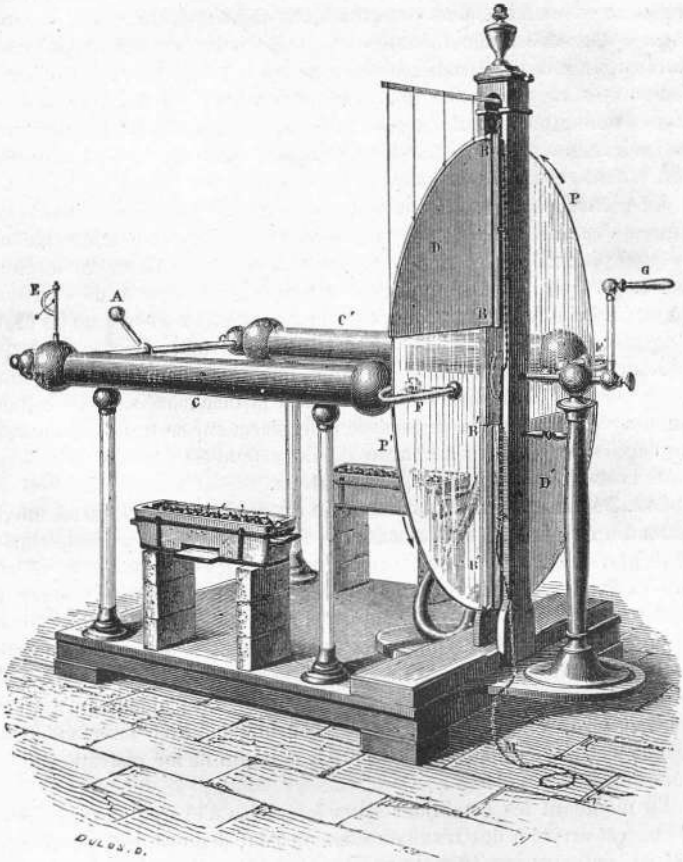


Fig. 451. — Machine électrique de Ramsden.

tive dont se chargent les coussins. — Le collecteur est donc le *pôle positif* de la machine; les coussins constituent le *pôle négatif*.

681. Limite de charge de la machine. — Sur le collecteur de la machine, on place généralement un petit pendule électrique E (*fig.* 461), qu'on désigne sous le nom d'*électromètre de Henley*; il se compose

d'une balle de sureau, fixée à l'extrémité d'une petite tige conductrice d'ivoire, qui est mobile autour de son point de suspension. Le support du pendule étant lui-même conducteur, la divergence de l'électromètre augmente avec la charge du collecteur, et par conséquent avec son potentiel, sans cependant lui être proportionnel. — Or, si l'on met une machine en activité, dans des conditions telles qu'il ne puisse y avoir *aucune déperdition*, on constate que, après quelques tours de plateaux, la divergence de l'électromètre cesse de croître. A partir de cet instant, les pointes ne paraissent plus lumineuses dans l'obscurité, elles ne laissent donc plus écouler d'électricité négative. La force électrique est alors devenue nulle en tous les points du collecteur, qui est arrivé à son potentiel maximum, ou à sa *limite de charge*.

En réalité, plusieurs causes tendent à rendre cette limite moins reculée qu'elle ne serait dans les conditions précédentes : telle est surtout la déperdition de l'électricité des conducteurs, par l'air et par les supports. Lorsque l'air est humide, on cherche à diminuer la déperdition, en plaçant des fourneaux sous les conducteurs, et en essuyant les pieds de verre avec un linge chaud et sec. — L'électricité développée sur le plateau se perd aussi, dans le temps que met chacun de ses points pour parvenir d'une paire de coussins à la mâchoire suivante : pour atténuer cette cause de déperdition, on place, sur ce trajet, des quarts de cercles D, D', formés chacun de deux feuillets de taffetas de soie, dans l'intervalle desquels passe le plateau.

682. Détermination expérimentale du débit et du potentiel maximum d'une machine de Ramsden. — Pour évaluer approximativement le *débit* d'une machine, on fait communiquer les coussins avec le sol, et l'on fixe à quelques centimètres du collecteur une sphère métallique reliée au sol; quand la machine est arrivée à une période d'activité régulière, on compte les étincelles qui jaillissent pendant une minute. — On constate ainsi que, pour une même machine, le débit est sensiblement proportionnel à la vitesse de rotation du plateau, ainsi qu'on pouvait le prévoir. — Il est surtout considérable avec les machines à grand plateau, et d'autant plus grand, pour un même plateau, que les coussins sont plus longs.

En modifiant les conditions dans lesquelles s'exerce le frottement, Péclet est arrivé à des résultats dont on peut déduire des conclusions particulièrement importantes, quant à la cause même de la production de l'électricité. — Il a constaté que le débit est *indépendant de la pression* exercée par les coussins sur le plateau : on peut remplacer les ressorts qui appliquent les coussins contre le verre, par des ressorts plus forts ou plus doux; le débit n'est pas modifié. Ce résultat prouve que la production de l'électricité est *indépendante de la grandeur du frottement*. Il paraît démontré, en effet, que la cause de la production de l'électricité est, comme le pensait Volta, *le contact de deux*

corps hétérogènes, le verre et le coussin ; le contact suffit pour établir entre ces deux corps une différence de potentiel en faveur du verre ; comme le coussin est au potentiel zéro, le verre est porté à un potentiel positif. — En outre, si l'on substitue, aux coussins de la machine, d'autres coussins plus larges, mais de même nature et de même longueur, on constate que, pour la même vitesse de rotation du plateau, le nombre des étincelles demeure le même : la grandeur du potentiel auquel est porté le verre ne dépend donc pas de la durée du contact du verre avec le coussin ; la différence de potentiel s'établit donc *instantanément*. — Mais le débit dépend de la *nature du verre* et de la *nature du frottoir*. Le plus souvent, on enduit les frottoirs d'or mussif (bisulfure d'étain).

Quant au *potentiel maximum* que puisse acquérir une machine déterminée, on en obtiendra une évaluation approximative, en se fondant sur ce fait d'expérience, que deux conducteurs, approchés progressivement l'un de l'autre, peuvent donner une étincelle à une distance d'autant plus grande que leur différence de potentiel est elle-même plus grande. — Dès lors, on mettra la machine en activité sans lui faire fournir aucun débit extérieur. On reconnaîtra qu'elle est arrivée à sa limite de charge, lorsque la divergence de l'électromètre de Henley cessera de croître ; on approchera alors progressivement du collecteur une sphère métallique reliée au sol, et l'on mesurera la longueur de *la plus grande étincelle* qui puisse jaillir. La sphère étant ici au potentiel zéro, cette longueur donnera une mesure grossière du potentiel du collecteur (*).

683. Électrophore. — L'électrophore (*fig.* 462) est une sorte de machine électrique, d'une extrême simplicité. Il se compose : 1° d'un disque ou *gâteau* de résine B, coulé dans un moule de bois ou de métal ; 2° d'un plateau d'un diamètre plus petit, en métal ou en bois couvert d'une feuille d'étain, et muni d'un manche de verre.

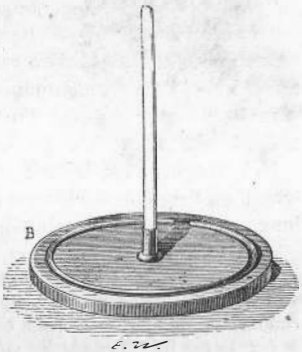


Fig. 462. — Électrophore.

On charge d'électricité négative le gâteau de résine, en le frottant avec une peau de chat bien sèche ; puis on y place le plateau métallique, qui s'électrise par influence : il se développe de l'électricité négative

(*) Il est à remarquer que la longueur de la plus grande étincelle que puisse fournir le collecteur ne peut jamais dépasser la distance des coussins aux mâchoires. En effet, si le collecteur pouvait être amené au potentiel qui correspond à cette longueur d'étincelle, une étincelle éclaterait entre les mâchoires, qui sont au potentiel du collecteur, et les coussins qui sont au potentiel zéro : la machine se déchargerait donc d'elle-même.

sur sa face supérieure MM′ (*fig.* 465), et de l'électricité positive induite sur sa face inférieure; cette électricité n'est pas sensiblement neutralisée par l'électricité négative de la résine, parce que la résine n'est pas conductrice, et que d'ailleurs le gâteau offre toujours des aspérités, ne permettant le contact que par un très petit nombre de points. Si l'on approche le doigt de la face supérieure du plateau, on obtient une petite étincelle, due à la combinaison de l'électricité négative de cette face avec l'électricité positive de la main, et le plateau reste chargé d'électricité ***positive***, qui est maintenue sur sa face inférieure. — Si maintenant on soulève le plateau, en le prenant par le manche de verre,

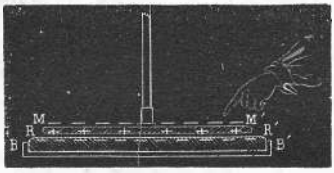


Fig. 465.

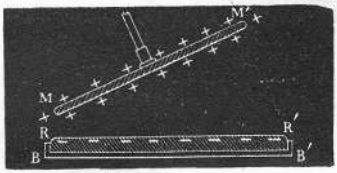


Fig. 464.

et qu'on l'éloigne de la résine (*fig.* 464), l'électricité positive qu'il contient se répand sur ses deux faces : il peut donner une étincelle quand on en approche le doigt, ou communiquer son électricité à un conducteur quelconque. — Cette manœuvre n'a d'ailleurs rien enlevé à la résine, en sorte que, si l'on replace le plateau métallique sur la résine, qu'on le remette en communication avec le sol et qu'on l'enlève par le manche de verre, on y constate un nouveau développement d'électricité; et ainsi de suite presque indéfiniment.

L'électrophore est la machine électrique des laboratoires de chimie; lorsqu'on l'emploie à charger une bouteille de Leyde, on peut, en prolongeant la manœuvre, obtenir des effets assez intenses.

684. Rôle du moule conducteur. — Le gâteau de résine peut conserver son électricité pendant un temps très long, si l'air est sec, et si le moule conducteur est relié au sol. La couche superficielle d'électricité négative agit *à la longue* par influence sur les couches intérieures de la résine; chaque tranche du gâteau présente alors les deux électricités positive et négative superposées (*fig.* 465). Il se produit aussi un phénomène d'influence dans le moule conducteur : l'électricité positive est attirée, et l'électricité négative est repoussée dans le sol. — On comprend alors que, sous l'action de la charge positive du moule, les deux électricités doivent demeurer séparées dans chaque tranche de la résine; d'autre part, la charge négative de la surface supérieure, en raison de l'attraction qu'elle subit, pénètre à une certaine profondeur, et ne peut que difficilement se perdre dans l'air.

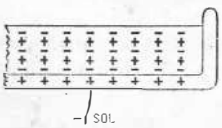


Fig. 465.

685. Machine électrique de Holtz. — Pour faire fonctionner l'électrophore, on vient de voir qu'il n'est nécessaire de développer, dans la résine, par frottement, qu'une quantité *limitée* d'électricité. Les déplacements successifs qu'on imprime ensuite au plateau mobile suffisent pour lui faire acquérir, par influence, des quantités *presque indéfinies* d'électricité, à la condition qu'on lui enlève, à chaque fois, l'électricité qu'il a acquise. — Il en est de même dans toutes les *machines à influence*, et c'est là ce qui les distingue des machines à frottement, telles que la machine de Ramsden.

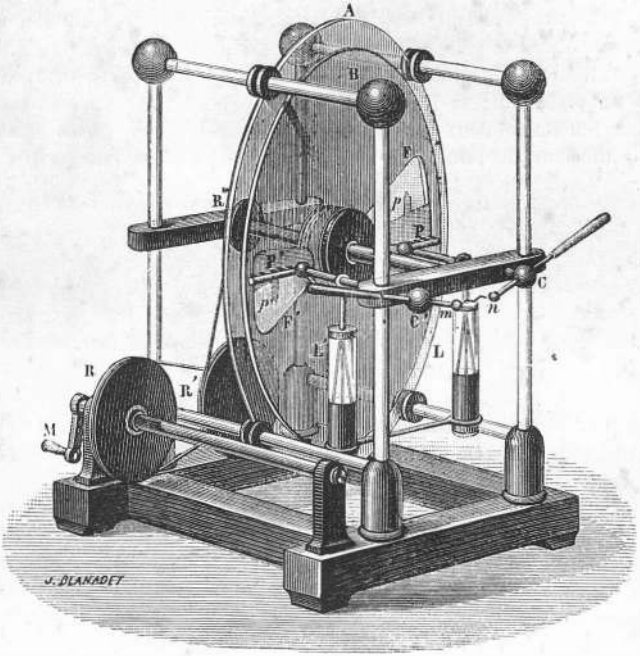


Fig. 466. — Machine électrique de Holtz.

La machine électrique de Holtz, sous sa forme la plus simple (*fig.* 466), présente deux plateaux de verre circulaires A, B, parallèles entre eux, et très voisins. L'un A est un *plateau fixe*, qui est assujetti entre des cales de bois, maintenues par des tiges de verre ; l'autre plateau B, d'un diamètre un peu plus petit, est *mobile* autour d'un axe passant par son centre ; la rotation se produit au moyen de la manivelle M et des roues R, R', R'', reliées entre elles par des cordes sans fin. En regard de la face antérieure du plateau B, sont disposés deux peignes

métalliques, P, P′, placés sur un même diamètre horizontal, et communiquant avec des conducteurs métalliques C, C′; ces conducteurs sont terminés par des boules *m*, *n*, dont on peut régler à volonté la distance en faisant glisser les tiges qui les supportent, et qui sont munies de manches isolants. — Le plateau mobile B ne présente aucune ouverture. Dans le plateau fixe A, sont pratiquées deux fenêtres F, F′ : dans la figure 466, on aperçoit ces fenêtres par transparence, au travers du plateau B; la figure 467, qui représente le plateau A seul, montre en outre deux bandes de carton mince *b*, *b′*, collées près du bord inférieur de l'une des fenêtres et près du bord supérieur de

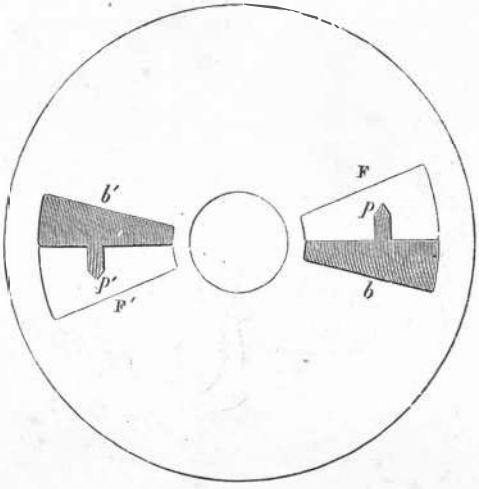


Fig. 467. — Plateau fixe de la machine de Holtz.

l'autre; elles sont terminées chacune par une pointe de carton, *p*, *p′*. — Pour mettre la machine en activité, on touche l'une des bandes de carton, *b* par exemple, avec une plaque de caoutchouc électrisée négativement : c'est ce qu'on appelle *amorcer* la machine. Cela fait, on amène au contact les boules *m* et *n* des conducteurs, et l'on met en mouvement le plateau B, en sens inverse des pointes *p* et *p′*. Après lui avoir fait faire quelques tours, on éloigne *m* de *n*, à quelques centimètres, et l'on obtient, en continuant à faire tourner le plateau A, une série continue de fortes étincelles entre les deux boules, pendant un temps presque indéfini, si l'air est bien sec. — Si l'on amène les deux boules à une distance telle que les étincelles ne puissent plus jaillir de l'une à l'autre, on peut se servir de l'un des conducteurs pour charger d'électricité un corps quelconque.

Voici comment on peut se rendre compte de cette production con-

tinue d'électricité. — La bande *b*, une fois chargée d'électricité négative par la plaque de caoutchouc, agit par influence, au travers du plateau mobile B, sur le peigne voisin P (*fig.* 466); par les pointes de ce peigne, s'écoule de l'électricité positive qui se porte sur la face antérieure du plateau mobile B, tandis que la boule *n*, qui termine le conducteur auquel ce peigne est fixé, se charge d'électricité négative : comme le mouvement du plateau mobile amène ensuite des parties nouvelles dans la région où cette action se produit, elle se continue avec la même intensité. D'autre part, les points du plateau mobile qui se sont ainsi chargés d'électricité positive arrivent devant la bande *b'*; ils agissent sur elle par influence, et, à cause de la pointe *p'*, y développent de l'électricité positive; en même temps, le plateau mobile reçoit, sur sa face postérieure, une quantité d'électricité négative à peu près égale à la quantité d'électricité positive que contenait sa face antérieure, et alors, en raison de sa minceur, il se comporte comme s'il était à l'état neutre. Mais la bande *b'*, électrisée positivement, agit sur le peigne P' comme *b* agissait sur P, c'est-à-dire qu'elle charge d'électricité positive le conducteur correspondant *m*; l'électricité négative, qui s'écoule par le peigne, est recueillie par le plateau mobile, et vient agir à son tour sur la bande *b*, et ainsi de suite (*).

Pour augmenter la force des étincelles que donne la machine, on adjoint généralement, aux deux conducteurs, deux petites bouteilles de Leyde L, L' (*fig.* 466), qui jouent le rôle de *condensateurs*, ou accumulateurs de l'électricité. Chacune d'elles est suspendue à l'un des conducteurs, et elles communiquent entre elles par leurs surfaces extérieures. — Nous verrons plus loin comment fonctionnent, en général, ces appareils condensateurs. Il suffira de dire ici que l'électricité développée dans chacun des conducteurs, par le jeu de la machine, s'accumule progressivement dans chacune des bouteilles, et les décharges ne se produisent qu'aux moments où les bouteilles sont chargées jusqu'à refus. — Les étincelles sont alors moins fréquentes, mais elles ont plus de volume et plus d'éclat.

686. Débit et potentiel maximum de la machine de Holtz. — Dans cette machine, les armatures intérieures des bouteilles L' et L sont respectivement les collecteurs de l'électricité positive et de l'électricité négative. Quoique ces bouteilles soient de petites dimensions, leur capacité électrique est plus grande que celle du collecteur de la machine de Ramsden. — Si l'on veut

(*) On construit aussi des machines *doubles*, formées de deux plateaux fixes, de part et d'autre desquels se trouvent deux plateaux mobiles, montés sur un même axe de rotation : les peignes se recourbent alors, en forme de mâchoires, comme dans la machine de Ramsden, de manière à présenter leurs pointes aux faces extérieures des deux plateaux mobiles. — Outre l'avantage que présentent ces machines, de fournir, en un même temps, deux fois plus d'électricité que les machines simples, l'expérience montre qu'elles ont aussi l'avantage de *rester amorcées* beaucoup plus longtemps, quand on cesse de faire tourner les plateaux mobiles.

tinue d'électricité. — La bande *b*, une fois chargée d'électricité négative par la plaque de caoutchouc, agit par influence, au travers du plateau mobile B, sur le peigne voisin P (*fig.* 466); par les pointes de ce peigne, s'écoule de l'électricité positive qui se porte sur la face antérieure du plateau mobile B, tandis que la boule *n*, qui termine le conducteur auquel ce peigne est fixé, se charge d'électricité négative : comme le mouvement du plateau mobile amène ensuite des parties nouvelles dans la région où cette action se produit, elle se continue avec la même intensité. D'autre part, les points du plateau mobile qui se sont ainsi chargés d'électricité positive arrivent devant la bande *b'*; ils agissent sur elle par influence, et, à cause de la pointe *p'*, y développent de l'électricité positive; en même temps, le plateau mobile reçoit, sur sa face postérieure, une quantité d'électricité négative à peu près égale à la quantité d'électricité positive que contenait sa face antérieure, et alors, en raison de sa minceur, il se comporte comme s'il était à l'état neutre. Mais la bande *b'*, électrisée positivement, agit sur le peigne P' comme *b* agissait sur P, c'est-à-dire qu'elle charge d'électricité positive le conducteur correspondant *m*; l'électricité négative, qui s'écoule par le peigne, est recueillie par le plateau mobile, et vient agir à son tour sur la bande *b*, et ainsi de suite (*).

Pour augmenter la force des étincelles que donne la machine, on adjoint généralement, aux deux conducteurs, deux petites bouteilles de Leyde L, L' (*fig.* 466), qui jouent le rôle de *condensateurs*, ou accumulateurs de l'électricité. Chacune d'elles est suspendue à l'un des conducteurs, et elles communiquent entre elles par leurs surfaces extérieures. — Nous verrons plus loin comment fonctionnent, en général, ces appareils condensateurs. Il suffira de dire ici que l'électricité développée dans chacun des conducteurs, par le jeu de la machine, s'accumule progressivement dans chacune des bouteilles, et les décharges ne se produisent qu'aux moments où les bouteilles sont chargées jusqu'à refus. — Les étincelles sont alors moins fréquentes, mais elles ont plus de volume et plus d'éclat.

686. Débit et potentiel maximum de la machine de Holtz. — Dans cette machine, les armatures intérieures des bouteilles L' et L sont respectivement les collecteurs de l'électricité positive et de l'électricité négative. Quoique ces bouteilles soient de petites dimensions, leur capacité électrique est plus grande que celle du collecteur de la machine de Ramsden. — Si l'on veut

(*) On construit aussi des machines *doubles*, formées de deux plateaux fixes, de part et d'autre desquels se trouvent deux plateaux mobiles, montés sur un même axe de rotation : les peignes se recourbent alors, en forme de mâchoires, comme dans la machine de Ramsden, de manière à présenter leurs pointes aux faces extérieures des deux plateaux mobiles. — Outre l'avantage que présentent ces machines, de fournir, en un même temps, deux fois plus d'électricité que les machines simples, l'expérience montre qu'elles ont aussi l'avantage de *rester amorcées* beaucoup plus longtemps, quand on cesse de faire tourner les plateaux mobiles.

faire en sorte que la machine ne débite que l'une des deux électricités, on relie l'un des pôles, *m* ou *n*, au sol.

Le *débit* est proportionnel à la vitesse de rotation, et à la surface du plateau qui passe à la fois entre les peignes et les bandes de papier. Comme il n'y a pas de frottement, on peut donner au plateau mobile une vitesse de rotation bien plus considérable qu'à celui de la machine de Ramsden.

Le *potentiel maximum* peut encore se mesurer par la longueur de la plus grande étincelle que l'on peut obtenir entre les deux boules *m* et *n*. La longueur de l'étincelle est limitée par la distance des deux peignes.

687. Réversibilité de la machine de Holtz. — Transport de l'énergie. — Quand la machine de Holtz est amorcée, et quand les deux conducteurs *m* et *n* sont au contact, il suffit d'un faible effort pour faire tourner le plateau; l'effort devient sensiblement plus grand, lorsqu'on sépare les deux conducteurs de manière à en faire jaillir de longues étincelles. Le *travail mécanique* de la force musculaire qui met le plateau en mouvement est alors, comme dans toute machine, équivalent à l'*énergie* dépensée dans les étincelles électriques, sous forme de vibrations calorifiques et de vibrations sonores.

Inversement, il est à prévoir que, si, sans agir sur la manivelle, on fournit, d'une manière continue, de l'électricité positive à l'un des deux pôles d'une machine de Holtz, et de l'électricité négative à l'autre pôle, les phénomènes d'influence que nous avons analysés (685) se succéderont en ordre inverse, et il en résultera une rotation continue du plateau. On pourra utiliser ce mouvement, par exemple, pour soulever un poids; alors l'énergie communiquée à la machine, sous la forme d'électricité, sera équivalente au travail résistant du poids soulevé. — C'est ce résultat que l'on exprime en disant que la machine de Holtz est *réversible*.

Enfin, les électricités positive et négative que l'on fournit ainsi aux deux pôles de la machine peuvent être empruntées à une autre machine de Holtz. — Si l'on accouple l'une à l'autre deux machines, en reliant leurs pôles positifs par un fil métallique, et leurs pôles négatifs par un autre fil, quand on amorcera l'une des machines et qu'on fera tourner son plateau, on verra l'autre machine se mettre en mouvement, et l'on pourra lui faire accomplir un travail. — C'est un mode de *transport de l'énergie*, comme nous en verrons d'autres exemples avec des machines électriques d'un autre genre.

688. Machine électrique de Carré. — La machine de Carré se compose de deux plateaux (*fig.* 468), l'un P en ébonite, l'autre P′ en verre; on fait tourner ces deux plateaux en sens inverse, au moyen de la manivelle R et d'une corde croisée; les transmissions de mouvement sont disposées de façon que la rotation du plateau P soit beaucoup plus rapide que celle du plateau P′. Ce dernier frotte constamment entre deux coussins F reliés au sol, de sorte qu'il reste constamment chargé d'électricité positive. En face du plateau P, et aux extrémités d'un même diamètre, se trouvent, comme dans la machine de Holtz, deux peignes M et M′, communiquant chacun avec l'un des conducteurs C et C′. — Les deux conducteurs étant amenés en contact, on met les plateaux en mouvement; dès que l'on éloigne C′ de C, il se produit, entre les conducteurs, une série continue d'étincelles.

On voit, en effet, que le plateau P′, électrisé positivement, doit agir par influence, au travers du plateau P, sur le peigne inférieur M : il

repousse l'électricité positive en C′, et attire l'électricité négative dans les pointes, qui la laissent écouler sur le plateau. Les points du plateau ainsi chargés négativement arrivent en face du peigne supérieur M′,

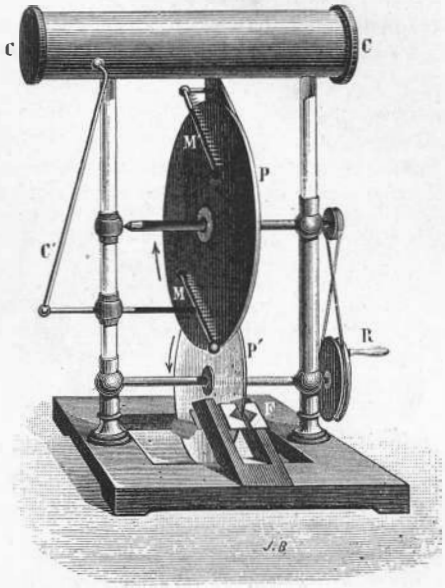


Fig. 468. — Machine électrique de Carré.

repoussent de l'électricité négative dans le conducteur C, et attirent dans les pointes l'électricité positive qui s'écoule sur le plateau lui-même. — Les conducteurs C et C′ sont donc respectivement les pôles négatif et positif de la machine.

689. Machine de Wimshurst. — La machine de Wimshurst est une machine à influence, qui présente sur la machine de Holtz l'avantage de s'amorcer en partant d'une charge initiale extrêmement petite.

Elle se compose de deux plateaux de verre identiques A, B (*fig.* 469), que l'on met en mouvement en sens inverse autour du même axe géométrique, au moyen de la manivelle *m* et de deux cordes sans fin, dont l'une est croisée. En avant du plateau antérieur A, est disposé un conducteur *aa′*, muni à ses deux extrémités de petits balais métalliques qui frottent contre des bandes d'étain, en forme de secteurs, collées sur le plateau A et gaufrées en relief. En arrière du plateau postérieur B est disposé un conducteur semblable *bb′*, muni de balais qui frottent contre des bandes d'étain collées sur ce plateau. Les conducteurs *aa′* et *bb′* communiquent avec le sol par l'axe de rotation : ils sont disposés

symétriquement par rapport à la verticale, et font entre eux un angle d'environ 60°. Deux peignes métalliques P et P′ communiquent avec les armatures intérieures C et C′ de deux bouteilles de Leyde, dont les armatures extérieures D et D′ communiquent entre elles et avec le sol. Enfin deux tiges métalliques, terminées par des boules M et M′, com-

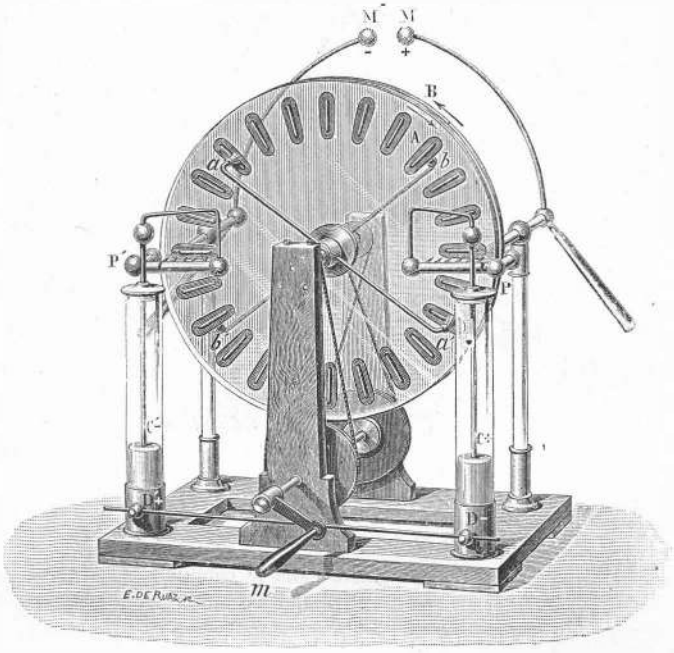


Fig. 469. — Machine électrique de Wimshurst.

muniquent respectivement avec les peignes P et P′, et peuvent être, à volonté, éloignées ou rapprochées l'une de l'autre.

Supposons les boules M et M′ en contact, et les deux plateaux en mouvement, A dans le sens des aiguilles d'une montre, B en sens inverse. Imaginons qu'il existe sur l'un des secteurs métalliques du plateau A, placé immédiatement à droite de *a*, une charge positive très faible. Quand ce secteur passe vis-à-vis de *b*, en raison de l'influence que sa charge exerce, à travers les deux plateaux de verre et la lame d'air, sur le conducteur *bb′*, le balai *b* dépose de l'électricité négative sur les secteurs de B qui arrivent successivement en contact avec lui. — Le mouvement se continuant, les secteurs de B, qui viennent d'être char-

gés négativement par *b*, arrivent vis-à-vis l'extrémité *a* du conducteur *aa'* : ils déterminent, par influence, l'apparition d'électricité positive en *a*, et d'électricité négative en *a'*. Les secteurs de B qui avaient été chargés positivement par *b'* arrivent, au même instant, vis-à-vis l'extrémité *a'* du conducteur *aa'*, et l'influence qu'ils exercent sur ce conducteur concorde avec la précédente, pour déterminer l'apparition d'électricité positive en *a* et d'électricité négative en *a'*. — Les secteurs du plateau A qui passent successivement devant *a* et devant *a'* se chargent donc successivement d'électricité positive et d'électricité négative; et ainsi de suite. — On conçoit que, après quelques tours de plateau, la petite charge initiale est ainsi progressivement accrue par ce jeu d'influence.

Or, les secteurs du plateau A, recueillant de l'électricité positive au contact du balai *a*, conservent leurs charges jusqu'à ce qu'ils arrivent devant les pointes du peigne P; là ils sont neutralisés par l'électricité négative qui s'écoule des pointes, tandis que l'électricité positive s'accumule dans le conducteur C, dont la capacité est considérable, sous un faible volume. — Dans le trajet de P en *a'*, ces mêmes secteurs sont à l'état neutre; ils deviennent négatifs au contact de *a'*, conservent leur charge de *a'* en P', et sont ensuite neutralisés par l'électricité positive qui s'écoule des pointes du peigne P', tandis que l'électricité négative s'accumule en C'. — On verrait de même que les secteurs de B sont négatifs de *b* en P', neutres de P' en *b'*, positifs de *b'* en P, et neutres de P en *b*. — En raison de ces actions successives, les conducteurs C et C' ont bientôt atteint leur limite de charge; alors les électricités positive et négative, qui sont constamment développées par influence en P et en P', se recombinent à travers le conducteur PMM'P'. Si l'on écarte les boules M et M', on obtient de puissantes étincelles, jaillissant à des intervalles rapprochés, chaque fois que les conducteurs C et C' arrivent à leur limite de charge.

Nous avons supposé qu'on avait communiqué, à l'origine, une charge très faible à l'une des bandes d'étain. En réalité, la machine, une fois qu'elle a fonctionné, reste à peu près indéfiniment amorcée. — En effet, l'un au moins des balais reste en contact avec l'une des bandes d'étain, et la laisse en communication avec le sol, par le conducteur qui le supporte. Une bande d'étain ainsi placée se comporte, par rapport au verre sur lequel elle est collée, comme se comporte, par rapport à la résine, le moule conducteur de l'électrophore. C'est ainsi que l'appareil conserve toujours une charge suffisante pour recommencer à fonctionner. — La machine de Wimshurst présente encore sur la machine de Holtz l'avantage de fonctionner même par les temps humides.

Avec deux machines de Wimshurst, accouplées comme il a été dit (687), on peut effectuer, comme avec deux machines de Holtz, l'expérience du transport de l'énergie.

VII. — CONDENSATION DE L'ÉLECTRICITÉ. — APPAREILS CONDENSATEURS.

690. Expérience fondamentale. — Lorsqu'un plateau métallique isolé A, placé *loin de tout autre conducteur*, est mis en communication, par une longue tige métallique *m*, avec une machine électrique en activité, l'équilibre s'établit quand le plateau est arrivé au potentiel constant V auquel la source fournit l'électricité positive : un pendule fixé à ce plateau diverge d'un angle α, en rapport avec la densité électrique sur les points voisins. — Approchons maintenant du plateau A, un plateau semblable B (*fig.* 470), relié au sol par une chaîne métallique S, et, pour éviter qu'une étincelle éclate entre les deux plateaux, séparons-les par une lame de verre C. L'équilibre établi précédemment ne peut plus subsister : sur le corps induit B, il doit se développer de l'électricité négative, et une égale quantité d'électricité positive doit être repoussée dans le sol. En même temps, il doit se produire en A, vis-à-vis de B, une accumulation de l'électricité positive du système inducteur constitué par le plateau A, la tige *m* et le collecteur de la machine. — Or l'expérience montre que, lorsqu'un nouvel état d'équilibre est établi, un pendule fixé sur la face externe du plateau B ne diverge pas (*fig.* 470) : la *charge négative du plateau B est donc tout entière sur sa face interne.* — D'autre part, le pendule de la face externe du plateau A présente *le même angle d'écart* α que dans le premier état d'équilibre ; la distribution de l'électricité sur la face externe de A est donc restée la même ; d'où l'on conclut que *la plus grande partie de la nouvelle charge positive de A est située sur sa face interne.* — En résumé, la charge totale de B et la plus grande partie de la charge de A sont alors *dissimulées* à l'observateur, par leur attraction réciproque ; on ne constate la présence d'*électricité libre* que sur la face externe du plateau relié à la machine.

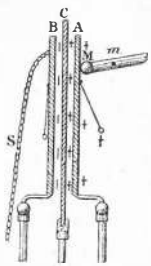


Fig. 470.

Pour faire apparaître les électricités accumulées sur les faces internes des plateaux A et B, il suffit d'écarter ces deux plateaux l'un de l'autre (fig. 471) : on voit aussitôt les deux pendules diverger très fortement. — Le plateau A, en particulier, avait donc acquis, dans ces conditions, une charge beaucoup *plus grande* que lorsqu'il était éloigné de tout autre conducteur : c'est le phénomène qu'on désigne sous le nom de *condensation.*

En réalité, la présence du conducteur B, relié au sol, doit être considérée comme ayant pour effet *d'accroître la capacité* du conducteur A. — En effet, lorsque le plateau A était éloigné de tout autre conducteur, il acquérait, pour arriver au potentiel V de la source, une charge *q* :

sa capacité c était déterminée par la relation $q = cV$. Lorsque ce même plateau est en présence du plateau B relié au sol, il acquiert, pour arriver au même potentiel V, une charge Q ; sa capacité C est alors déterminée par la relation $Q = CV$. Puisque la charge Q est plus grande que q, il en faut conclure que la nouvelle capacité C est plus grande que c.

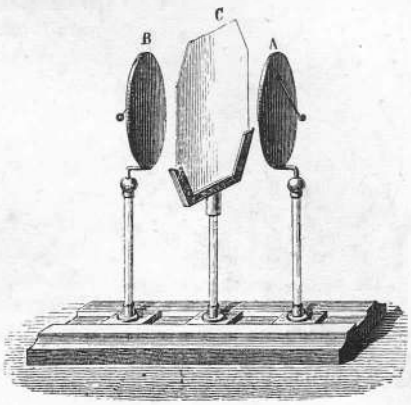


Fig. 471. — Condensateur à lame de verre.

L'appareil qui vient d'être décrit, et qui fut imaginé par Æpinus en 1760, est un *condensateur à plateaux*. — Un condensateur, en général, est formé de deux conducteurs séparés par une substance isolante (air, verre, soufre, mica,...etc.); l'un de ces conducteurs, mis en communication avec une source électrique, prend le nom de *collecteur* ; l'autre, relié au sol, prend le nom de *condenseur*. — Lorsque le condenseur enveloppe complètement le collecteur, le condensateur est dit *fermé* ; le collecteur et le condenseur prennent les noms *d'armature intérieure* et *armature extérieure*. — Chaque condensateur est caractérisé par sa *capacité électrique*, c'est-à-dire par la capacité du collecteur, en supposant toujours le condenseur relié au sol.

691. Force condensante. — On appelle *force condensante* d'un condensateur déterminé, le rapport de la charge Q qu'une source électrique peut communiquer au collecteur quand il fait partie du condensateur, à la charge q que cette même source donnerait au collecteur pris isolément. Or on a

$$\frac{Q}{q} = \frac{CV}{cV} = \frac{C}{c};$$

la force condensante est donc encore exprimée par le rapport de la *capacité* du collecteur lorsqu'il fait partie du condensateur, à celle de ce même collecteur pris isolément.

Quand le collecteur et le condenseur ont des formes quelconques, le calcul des capacités C et c est généralement compliqué. Il est particulièrement simple, comme on va le voir, pour un condensateur fermé, dont les armatures sont des sphères concentriques.

692. Condensateur sphérique à lame d'air. — Soit une sphère conductrice A, de rayon R, et une enveloppe sphérique conductrice B, de

rayon intérieur $R' = R + e$, e étant l'épaisseur de la couche d'air qui les sépare (*fig.* 472). — D'après ce qu'on a vu (667), la sphère A, seule et éloignée de tout autre conducteur, aurait une capacité électrique c exprimée par le même nombre que son rayon R; mise en communication avec une source au potentiel V, elle prendrait une charge $q = RV$. Entourée de l'enveloppe B reliée au sol, elle acquiert une charge plus grande Q; en même temps, d'après le théorème de Faraday (640), il se développe, sur la surface interne de l'enveloppe, une charge négative égale — Q. Or le potentiel en un point quelconque pris à l'intérieur de A doit être égal à V; il est égal à la somme algébrique de deux potentiels : l'un $\frac{Q}{R}$, dû à la couche sphérique positive + Q, de rayon R; l'autre $\frac{-Q}{R+e}$, dû à la couche sphérique négative, de rayon $R + e$. On doit donc avoir $V = \frac{Q}{R} - \frac{Q}{R+e}$, d'où $Q = \frac{VR(R+e)}{e}$. — La capacité électrique du collecteur, lorsqu'il fait partie du condensateur, est donc $C = \frac{R(R+e)}{e}$; et par conséquent la force condensante $\frac{C}{c}$ a pour valeur $\frac{R+e}{e}$.

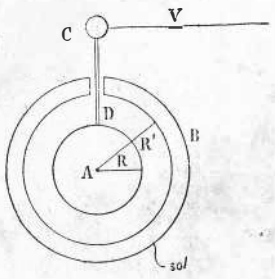


Fig. 472. — Condensateur sphérique.

Si le rayon R est très grand par rapport à e, on a sensiblement

$$C = \frac{R^2}{e} = \frac{4\pi R^2}{4\pi e} = \frac{S}{4\pi e},$$

en désignant par S la surface $4\pi R^2$ du condensateur.

On voit donc que la capacité d'un condensateur sphérique est sensiblement *proportionnelle à la surface de l'armature intérieure*, et *en raison inverse de l'épaisseur de la lame d'air*, quand celle-ci est très petite par rapport aux dimensions du condensateur.

On démontre que ce résultat subsiste pour tous les condensateurs *fermés* dans lesquels les surfaces des deux armatures sont, en tous leurs points, parallèles et peu distantes. — Il est encore sensiblement exact pour un condensateur à plateaux, quand l'épaisseur de la lame isolante est très faible par rapport au diamètre des plateaux.

693. Condensateur à lame de verre. — Bouteille de Leyde. — Batteries. — Lorsqu'on veut charger un condensateur *à lame d'air*, de forme quelconque, au moyen d'une machine à potentiel élevé, pouvant

donner une longue étincelle, on est obligé de maintenir les deux armatures à une distance *e* plus grande que la longueur de cette étincelle la force condensante est alors peu considérable. — Dans le condensateur d'Æpinus, on interpose entre les plateaux une lame de verre C (*fig.* 470), vernie à la gomme laque, qui, à épaisseur égale, offre à l'étincelle une résistance plus grande que celle de l'air : on peut ainsi placer les plateaux à une distance moindre.

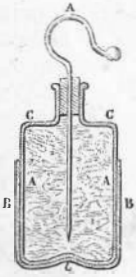


Fig. 473.

De tous les condensateurs à *lame de verre*, le plus fréquemment employé est la *bouteille de Leyde*. — La lame isolante est la paroi CC d'un flacon de verre mince (*fig.* 473). Le collecteur, ou armature intérieure, est constitué par des feuilles d'or ou de clinquant A, ou par tout autre conducteur s'appliquant sur la surface interne de la bouteille; au milieu, est une tige de métal terminée en pointe à sa partie inférieure, et maintenue par un bouchon verni à la gomme laque. Le condenseur, ou armature extérieure, est constitué par une feuille d'étain B, collée sur la bouteille, et s'élevant jusqu'au voisinage de sa partie supérieure.

Pour charger la bouteille, on la prend ordinairement à la main, par la panse, ce qui met en communication l'armature extérieure avec le sol (*fig.* 474); et l'on fait communiquer la tige avec une machine électrique (*). — On peut aussi, pour obtenir des charges peu considérables, toucher un certain nombre de fois l'armature intérieure avec le plateau d'un électrophore, que l'on replace sur la résine après chaque contact.

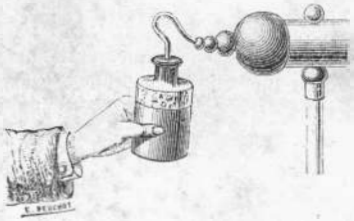


Fig. 474.
Charge de la bouteille de Leyde.

La bouteille de Leyde pouvant être considérée comme un condensateur *fermé*, la charge négative induite de la panse est égale à la charge positive inductrice de l'armature intérieure (640).

Les batteries électriques (*fig.* 475) sont des réunions de grosses bouteilles de Leyde, ou *jarres*, dont on fait communiquer toutes les armatures intérieures par des tiges métalliques qui convergent en D. Elles

(*) C'est à Leyde, en 1746, que furent observés, pour la première fois, les effets d'un semblable condensateur. — On rapporte que Cunéus, élève de Muschenbroeck, ayant eu l'idée d'électriser de l'eau, placée dans un vase de verre, prit le vase à la main, et fit plonger dans le liquide une pointe métallique, communiquant avec une machine électrique. En approchant alors l'autre main de la tige, il éprouva une commotion incomparablement plus forte qu'il ne l'avait prévu d'après la puissance de la machine. On voit que, dans cette expérience, le collecteur était représenté par la tige et par le liquide; la lame isolante, par le verre; le condenseur, par la main qui tenait le vase.

sont placées dans une caisse de bois dont l'intérieur est garni d'une feuille d'étain, qui met en communication toutes les armatures intérieures et qui communique elle-même avec la poignée métallique A.

Pour charger la batterie, on met l'anneau D en communication avec

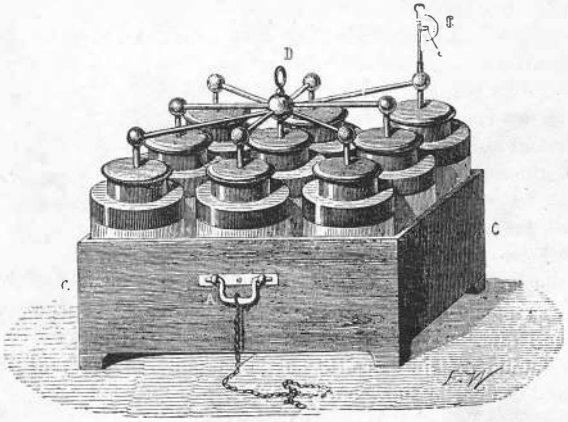


Fig. 475. — Batterie électrique.

une machine électrique, et la poignée A en communication avec le sol par une chaîne métallique. Un électromètre de Henley, placé en E, permet de se rendre compte des progrès que fait la charge.

694. Décharge successive d'un condensateur. — Un condensateur à lame de verre ayant été chargé comme nous l'avons dit, et les communications avec la machine et avec le sol ayant été interrompues, si l'on approche le doigt du plateau A qui contient de l'électricité libre (*fig.* 476), on en tire une petite étincelle : aussitôt le pendule de ce plateau tombe au repos, et celui du plateau B diverge. — On voit, en effet, que le contact du doigt a dû enlever au plateau A une partie de l'électricité positive qu'il contenait, et qui attirait l'électricité négative à la face interne de B : dès lors, une partie de l'électricité négative de B a dû devenir libre, et produire la divergence du pendule de ce côté. — En touchant maintenant le plateau B, on obtient de même une petite étincelle, et le pendule de B retombe, tandis que celui de A diverge. L'explication précédente est encore applicable, puisque les rôles des deux plateaux sont simplement intervertis. — En continuant à toucher alternativement l'un et l'autre plateau, on obtient des étincelles de plus en plus faibles. Théoriquement, on ne doit jamais arriver ainsi

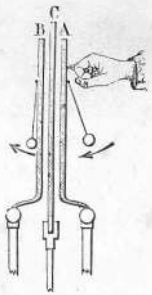


Fig. 476.

à décharger complètement le condensateur, puisqu'on n'enlève, à chaque contact, qu'une fraction de la charge restante (*).

L'expérience peut s'effectuer d'une manière semblable avec une bouteille de Leyde, placée sur un support isolant. — On peut aussi faire en sorte que la décharge successive s'effectue d'elle-même, à l'aide d'une disposition ingénieuse qui est due à Franklin (*fig.* 477). La tige de la bouteille porte un timbre C, et la panse communique avec un autre timbre A. Une petite balle métallique B, isolée par un fil de soie, est placée entre les deux timbres : elle est successivement attirée par C et A, et décharge la bouteille par une série de petites étincelles. On obtient ainsi un carillon continu, jusqu'à ce que la bouteille soit à peu près déchargée.

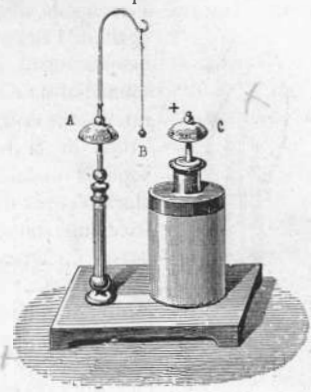


Fig. 477. — Carillon.

695. Décharge instantanée. — La décharge instantanée s'obtient en établissant une communication par un corps conducteur, entre les deux armatures d'un condensateur chargé. C'est ce qu'on peut faire en appliquant une main sur l'une des armatures, et venant toucher l'autre armature avec l'autre main ; mais la combinaison des électricités contraires à travers le corps humain produit une commotion qui est souvent pénible. — On préfère se servir d'un excitateur (*fig.* 478), formé de deux arcs métalliques articulés à charnière, et dont les extrémités libres sont terminées par des boules. Quand on veut opérer sur des condensateurs fortement chargés, on isole les arcs métalliques par des manches de verre M, M'.

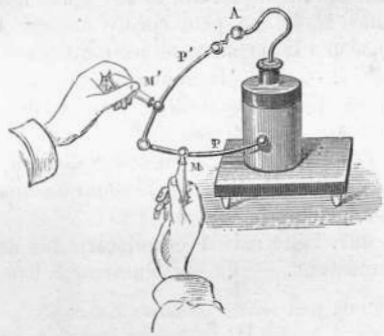


Fig. 478. — Décharge de la bouteille de Leyde.

Voici comment on peut analyser le phénomène de la décharge instantanée. — Supposons que, après avoir chargé un condensateur à plateaux, on mette l'une des boules F de l'excitateur en contact avec le plateau B (*fig.* 479), et qu'on approche lentement l'autre boule G du

(*) On trouvera, dans les problèmes d'électricité, le calcul des quantités d'électricité qui interviennent dans les décharges successives d'un condensateur sphérique.

plateau A. L'équilibre électrique ne peut plus subsister : sous l'influence de l'électricité libre de A, il doit apparaître en G de l'électricité négative, et, quand la distance devient suffisamment petite, il doit se produire, entre A et G, une étincelle due à la combinaison, à travers l'air, de la petite quantité d'électricité négative induite en G, avec une quantité égale de l'électricité positive qui est libre sur la face externe de A. Cette première décharge a pour effet immédiat de diminuer la résistance de la couche d'air interposée entre la boule et le plateau, tant par l'élévation de la température que par l'entraînement de vapeurs métalliques; les plateaux A et B, n'étant plus alors séparés que par une couche à peu près conductrice, une nouvelle quantité d'électricité positive peut passer de A sur B, l'électricité négative se déplaçant en sens inverse, en sorte qu'il se produit ainsi une série ininterrompue d'étincelles, jusqu'à ce que les deux plateaux arrivent au même potentiel. — On s'explique ainsi que l'étincelle de la décharge instantanée soit beaucoup plus sonore et beaucoup plus brillante que celles de la décharge successive. On observe d'ailleurs que la couleur de l'étincelle varie avec la nature des métaux qui forment les surfaces en présence.

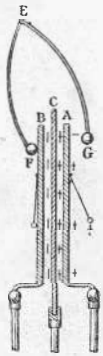


Fig. 479.

696. Charges résiduelles. — Un condensateur à lame de verre, n'est jamais ramené à l'état neutre après une seule décharge; quelques minutes après, on peut encore obtenir une deuxième étincelle, moins forte que la première, et accusant sur le condensateur un *résidu* d'électricité. — Après la deuxième étincelle, il reste encore une charge résiduelle qui permet d'obtenir, au bout de quelques instants, une troisième étincelle, et ainsi de suite.

Ces charges résiduelles s'expliquent, comme on va le voir, par la pénétration de l'électricité *dans la lame isolante* qui sépare les deux conducteurs métalliques (*).

697. Pénétration des électricités dans la lame isolante d'un condensateur. — Un condensateur à lame de verre étant chargé, si l'on

(*) On peut rendre manifeste l'adhérence de l'électricité pour les corps mauvais conducteurs, par l'expérience des *figures de Lichtenberg*. — On touche, avec un corps chargé d'électricité positive, divers points d'un gâteau de résine, de manière à y tracer une figure invisible, un cercle, par exemple. On trace ensuite, avec un corps chargé d'électricité négative, une autre figure, par exemple deux diamètres. Si l'on projette alors sur le gâteau un mélange de soufre et de minium pulvérisés, on voit les deux figures apparaître, l'une avec la couleur jaune du soufre, l'autre avec la couleur rouge du minium. Ce résultat s'explique en remarquant que, au moment de la projection de la poudre, le contact des grains les uns avec les autres a chargé le soufre d'électricité négative, et le minium d'électricité positive : le soufre s'est porté sur les points du gâteau où l'électricité positive était restée adhérente ; le minium, sur les points chargés d'électricité négative.

éloigne du verre les plateaux métalliques (*fig.* 471), et qu'on touche ensuite successivement les deux plateaux A et B, on voit les deux pendules retomber. Cependant, si l'on applique de nouveau les plateaux sur la lame de verre, on tire encore du système une vive étincelle. C'est donc *sur le verre* que se trouvaient, en plus grande partie, les électricités contraires.

On peut encore le démontrer avec une bouteille de Leyde (*fig.* 480) dont les armatures A et B sont formées par des pièces métalliques, pouvant se détacher du bocal de verre intermédiaire C. — On charge cette

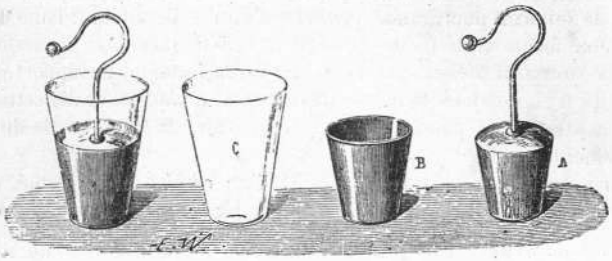


Fig. 480. — Bouteille à armatures mobiles.

bouteille, et on la place sur un support isolant; on enlève avec la main l'armature intérieure, ce qui conduit son électricité dans le sol; on retire ensuite le vase de verre C, et l'on met l'armature extérieure B en communication avec le sol. Si l'on recompose alors la bouteille, on peut encore obtenir une décharge très forte.

Pour mettre en évidence la pénétration des deux électricités à l'intérieur de la lame isolante, pendant la charge du condensateur, Faraday a construit un condensateur (*fig.* 481) avec deux plaques métalliques *a* et *b*, séparées par deux lames épaisses de blanc de baleine C et D appliquées l'une contre l'autre. Le système étant chargé, on rompt les communications avec la machine et avec le sol, et l'on tire une étincelle avec l'excitateur. Si l'on examine les plaques métalliques *a* et *b* immédiatement après cette décharge, on les trouve à l'état neutre; si l'on abandonne ensuite à lui-même le système isolé, on trouve, sur les plaques, des *charges de retour* plus faibles, mais de même sens que les charges primitives. — Ces charges de retour sont d'autant plus considérables, qu'on a plus longtemps abandonné l'appareil à lui-même avant d'effec-

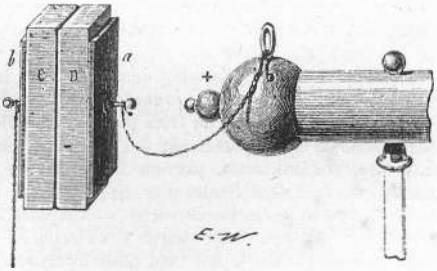


Fig. 481.

tuer la décharge. Donc, pendant la charge et dans les instants suivants, les deux électricités contraires, s'attirant mutuellement, avaient pénétré progressivement dans la lame isolante, à une profondeur assez grande pour ne plus leur permettre d'intervenir dans la décharge.

698. Influence de la nature de la lame isolante. — Pouvoir inducteur spécifique du diélectrique. — La lame isolante d'un condensateur ne joue pas seulement le rôle d'une sorte de barrière, s'opposant à la combinaison des électricités accumulées sur les deux armatures. L'expérience montre, en outre, que la capacité d'un condensateur à lame de verre est plus grande que celle d'un condensateur à lame d'air, de même forme et de même dimension. — D'une manière générale, on appelle *constante diélectrique* d'une substance isolante, le rapport de la capacité d'un condensateur construit avec une lame de ce diélectrique, à la capacité d'un condensateur à lame d'air, de forme et de dimensions identiques.

Ainsi, on a vu (692) que la capacité d'un condensateur fermé, dans lequel les deux armatures, de surface S, sont séparées par une lame d'air, d'épaisseur e très petite, est $C = \frac{S}{4\pi e}$; la capacité C′ du même condensateur, à lame de verre, est donnée par l'expression $C' = k\,\frac{S}{4\pi e}$, le coefficient k étant plus grand que l'unité : c'est la *constante diélectrique*, caractéristique du verre qui a été employé. — On peut dire encore que, au point de vue de la capacité, le condensateur à lame de verre se comporte comme un condensateur à lame d'air dans lequel la distance des armatures serait réduite dans le rapport de k à 1.

Ce résultat peut s'expliquer en admettant que, à une même distance, l'*influence* exercée entre deux conducteurs varie avec la nature du milieu diélectrique interposé. De là, le nom de *pouvoir inducteur spécifique*, qui a été donné à ce coefficient k.

Une expérience de Faraday démontre que les divers corps diélectriques n'ont pas le même *pouvoir inducteur spécifique*.

L'appareil se compose de trois plateaux métalliques A, C, B (*fig.* 482), placés parallèlement et supportés par des pieds de verre mobiles. Le plateau A est mis en communication, par un fil métallique, avec une feuille d'or a; le plateau B, avec une feuille d'or b; ces deux feuilles sont *isolées l'une de l'autre*, dans une cloche de verre. — On place les plateaux A et B à la même distance du plateau C, on charge C d'électricité positive, A et B étant mis en communication avec le sol : les faces internes de A et B prennent alors une charge négative, mais les feuilles a et b restent à l'état neutre, et l'on n'observe entre elles ni attraction, ni répulsion. Enfin, on supprime les communications de A et de B avec le sol, et les choses restent dans le même état. — On voit que C joue, soit par rapport à A, soit par rapport à B, le rôle d'inducteur : il développe, dans l'un et dans l'autre, à une même distance, des charges négatives égales.

Or, si l'on approchait alors A de C, il y aurait dans A une nouvelle décomposition, faisant apparaître dans la feuille *a* de l'électricité *positive*. D'autre part, l'accumulation d'électricité négative dans le plateau A devenant plus grande que primitivement, la distribution de l'électricité positive sur C serait modifiée; par suite, une partie de l'électricité négative primitivement retenue sur la face interne du plateau B étant mise en liberté, on verrait apparaître dans la feuille *b* de l'électricité *négative*. Dès lors, il se produirait une *attraction* entre les feuilles d'or. — On observerait encore le même effet d'*attraction*, mais avec des *charges inverses*, si l'on éloignait A de C. — On peut d'ailleurs vérifier ces résultats par l'expérience, et ces essais préliminaires peuvent donner une idée du degré de sensibilité de l'appareil.

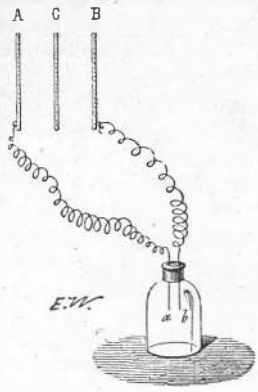


Fig. 482.
Expérience de Faraday.

Voici maintenant l'expérience de Faraday. — Les deux plateaux A et B étant à une même distance de C, et l'appareil ayant été chargé comme il a été dit, on interpose entre A et C une plaque de gomme laque, *sans modifier les distances* des plateaux métalliques. On observe alors une *attraction* entre les feuilles d'or; celles-ci retombent verticalement, dès qu'on enlève la plaque de gomme laque. — La substitution de la plaque de gomme laque, à une couche d'air de même épaisseur, a donc *modifié* l'induction exercée par le plateau C sur le plateau A. Or, Faraday a constaté que la feuille *a* prenait, dans l'expérience ainsi faite, une charge *positive*; il en résulte que la gomme laque a un pouvoir inducteur *plus grand* que celui de l'air. — Il en est de même du verre. — Enfin, de tous les corps sur lesquels ont porté les expériences de Faraday, c'est le mica qui a le pouvoir inducteur le plus considérable.

699. Condensateurs étalons, pour la mesure des capacités. — Pour évaluer expérimentalement la capacité d'un condensateur, tel qu'une bouteille de Leyde, l'armature extérieure étant reliée au sol, on compare (672) la capacité de son armature intérieure à celle d'un *étalon de capacité*, qui est ordinairement le microfarad (669) ou une de ses subdivisions.

Mais, pour obtenir, au moyen d'un conducteur unique, de forme sphérique, un étalon de capacité d'un microfarad, le calcul montre qu'il faudrait donner à la sphère un rayon de 9 kilomètres : l'emploi de condensateurs permet, au contraire, de réaliser un pareil étalon sous un petit volume. — Les *condensateurs étalons* sont formés de lames de mica, superposées; sur chacune des faces de ces lames, sont collées des feuilles d'étain. Toutes les feuilles d'ordre impair communiquent ensemble, d'un côté de la pile de lames, et constituent le collecteur; les feuilles d'ordre pair sont réunies entre elles, de l'autre côté : on les met en communication avec le sol, par les conduites d'eau. On règle le nombre des

lames, de manière que la capacité du collecteur soit d'un microfarad, ou d'une subdivision du microfarad (*).

700. Électroscope condensateur de Volta. — L'électroscope condensateur de Volta (*fig.* 483) est un électroscope à feuilles d'or (676), dans lequel la boule supérieure est remplacée par un condensateur. La tige qui supporte les feuilles se termine par un plateau métallique A, couvert sur sa face *supérieure* d'une couche mince d'un vernis à la gomme laque : sur celui-ci, on pose un second plateau B, dont la face *inférieure* est couverte d'une couche du même vernis.

Supposons qu'on ait à reconnaître la nature de l'électricité d'une source telle que, tout en n'ayant qu'un potentiel très petit, elle ait la propriété de reproduire instantanément l'électricité qui lui aura été enlevée, de manière à conserver toujours ce même potentiel (**). Mettons cette source en communication avec la face inférieure du plateau A, et touchons le plateau supérieur B avec la main. Les couches de vernis qui forment la lame isolante du condensateur n'ayant qu'une épaisseur très petite, la capacité électrique du plateau A est considérable; par suite, quoique le potentiel V de la source ait une très petite valeur, la charge $q = CV$, que prend le plateau A, peut acquérir une valeur appréciable. — Supprimons maintenant les communications avec la source et avec le sol, et enlevons le plateau B au moyen de son manche de verre : l'électricité qui était accumulée sur le plateau A, n'étant plus maintenue contre la couche de vernis, se répandra sur la tige et sur les feuilles. On observera alors une divergence, et l'on pourra constater ensuite la nature de la charge de l'instrument, en approchant un corps chargé d'une électricité connue.

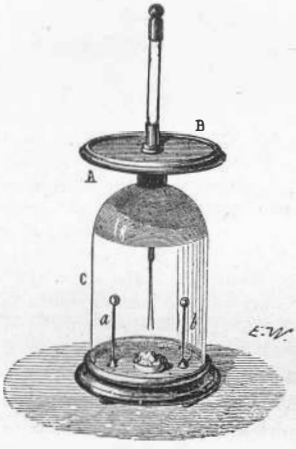


Fig. 483.
Électroscope condensateur de Volta.

(*) On peut, comme l'a indiqué M. Bouty, remplacer les feuilles d'étain par des couches d'argent infiniment minces, déposées chimiquement sur les deux faces du mica. En employant des lames de mica très minces, on construit des étalons dont la capacité est d'un microfarad, et dont le volume est celui d'un livre de petit format.

(**) Cette propriété est celle qui caractérise les sources d'électricité que nous étudierons dans le chapitre III, et qu'on désigne sous le nom de *sources voltaïques*.

VIII. — ÉNERGIE ÉLECTRIQUE. — EFFETS DES DÉCHARGES.

701. Énergie potentielle d'un corps électrisé. — Quand on charge un conducteur au moyen d'une machine de Ramsden ou d'une machine de Holtz, si le mouvement est uniforme, le travail moteur de la force musculaire, appliquée à la manivelle, est égal au travail résistant des forces électriques mises en jeu dans l'appareil (24). Or ces forces électriques sont dues à la répulsion exercée par l'électricité déjà accumulée dans le conducteur, sur l'électricité qui continue à affluer : ce sont, par rapport au conducteur, des forces *intérieures*. On peut donc dire que l'électrisation d'un conducteur correspond à un *accroissement de son énergie potentielle* (31).

Réciproquement, quand un conducteur se décharge, les forces électriques intérieures agissent comme des forces motrices; par conséquent, la décharge d'un conducteur électrisé correspond à une *diminution de son énergie potentielle* (31). — L'énergie potentielle qui a disparu dans le conducteur se retrouve en quantité égale, à l'état d'énergie *actuelle*, dans les milieux que traverse successivement la décharge, soit sous forme de vibrations sonores, soit sous forme de vibrations lumineuses ou calorifiques.

Or, si l'on effectue la décharge au moyen d'un fil métallique long et fin, l'étincelle est très faible, et l'énergie se retrouve, à peu près tout entière, sous forme de vibrations calorifiques, dans le fil lui-même : si ce fil est placé dans un calorimètre, on peut mesurer la quantité de chaleur dégagée; le produit de cette quantité de chaleur, en petites calories, par l'équivalent mécanique de la petite calorie, 41 700 000, représente, en *ergs*, l'énergie potentielle électrique W que le conducteur avait acquise par l'électrisation, et qu'il a perdue par la décharge. — Cette énergie W ne dépend d'ailleurs pas uniquement de la quantité d'électricité mise en jeu dans la décharge. De même que, dans la chute d'une certaine quantité d'eau, la perte d'énergie dépend à la fois de la masse de l'eau et de la hauteur de chute; de même, l'énergie potentielle d'un conducteur électrisé, c'est-à-dire l'énergie qui apparaît à l'état actuel dans le phénomène de la décharge, dépend à la fois de *sa charge* et de *son potentiel*. — On démontre que l'énergie W du conducteur, évaluée en ergs, a pour mesure le demi-produit de sa charge Q par son potentiel V, ces deux quantités étant évaluées en unités électrostatiques C.G.S.; c'est-à-dire que l'on a

$$W = \frac{VQ}{2}.$$

Pour établir cette relation, supposons que, au moyen d'une machine, on électrise positivement un conducteur, de capacité C. — A un instant donné, le conducteur est arrivé à un potentiel V′, et possède une charge CV′. Après un petit intervalle de temps θ, le potentiel, étant devenu V″, peu différent de V′, la charge du conducteur est devenue CV″; elle a donc augmenté d'une quantité $q = C(V'' - V')$. Cherchons quel est le travail dépensé pour arriver à ce résultat. — En général, dire que le potentiel d'un conducteur est V, c'est dire que, si l'unité de masse positive se déplaçait de ce conducteur jusqu'au sol, le travail des forces électriques serait de V ergs. Inversement, quand on fait passer l'unité de masse électrique du sol sur un conducteur au potentiel V, il faut dépenser un travail de V ergs contre les forces électriques intérieures, qui agissent alors comme résistantes. Or, dans le cas actuel, pendant le petit intervalle de temps θ, on peut considérer le conducteur comme ayant été au potentiel moyen $\frac{V' + V''}{2}$; dès lors, pour transporter la quantité d'électricité q du sol sur ce conducteur, on a dépensé un travail dont la valeur est $q\frac{V' + V''}{2}$, ou, en remplaçant q par sa valeur, $C\frac{V''^2 - V'^2}{2}$. — Cela posé, il est facile d'évaluer l'énergie potentielle W, accumulée dans un conducteur qu'on aura porté du potentiel zéro à un potentiel V. Décomposons le temps nécessaire à l'électrisation en n petits intervalles égaux à θ, et soient V_1, V_2, V_3... V_{n-1}, V, les valeurs successives du potentiel au bout de ces intervalles de temps successifs : les accroissements successifs de l'énergie seront

$$C\frac{V_1^2 - 0}{2}, \quad C\frac{V_2^2 - V_1^2}{2}, \quad \ldots \quad C\frac{V^2 - V_{n-1}^2}{2};$$

la somme de ces accroissements, c'est-à-dire l'énergie totale du système, est $W = C\frac{V^2}{2}$, ou, en remarquant que le produit CV représente la charge Q du conducteur,

$$W = \frac{VQ}{2}.$$

Remarque. — Cette formule est encore applicable quand on évalue Q *en coulombs*, et V *en volts*; mais alors l'énergie W est exprimée *en joules*. Soit, en effet, un conducteur chargé de Q coulombs, au potentiel de V volts; son énergie, en ergs, est égale à

$$\frac{1}{2}\frac{V}{500} \times Q \times 3 \times 10^9 = \frac{VQ}{2} \times 10^7 \text{ ergs}, \quad \text{ou} \quad \frac{VQ}{2} \text{ joules},$$

puisque le joule vaut 10^7 ergs (56).

702. Effets généraux des décharges électriques. — Quand il se produit une décharge électrique à travers un milieu plus ou moins résistant, l'énergie mise en jeu donne lieu à des phénomènes divers, selon la constitution du milieu lui-même. De là, la distinction que l'on établit ordinairement entre les divers effets produits par les décharges : *effets mécaniques, calorifiques, lumineux, chimiques, physiologiques.*

Dans chacun des exemples que nous allons prendre, quel que soit celui de ces effets qui se manifeste d'une manière prédominante, il sera facile de constater, même sans effectuer aucune mesure, que son intensité dépend à la fois de la *quantité d'électricité* mise en jeu dans la décharge, et de la *différence de potentiel* que présentaient les conducteurs entre lesquels la décharge s'effectue.

703. Effets mécaniques. — Lorsqu'une décharge traverse un corps *solide*, *mauvais conducteur*, elle produit un choc violent dans les points qu'elle traverse : le corps est alors généralement percé ou brisé.

C'est ainsi qu'une carte, placée entre les deux boules d'une machine de Holtz en activité, est immédiatement percée. En déplaçant la carte, on arrive à la cribler de trous, en quelques instants.

Plaçons maintenant, entre deux pointes métalliques verticales A et B, une lame de verre mince C (*fig.* 484), posée horizontalement sur un petit support de verre. Après avoir chargé une bouteille de Leyde, faisons communiquer son armature extérieure avec la pointe inférieure B, au moyen d'une chaine métallique, et approchons de la tige A l'armature intérieure de la bouteille : l'étincelle, en éclatant entre les deux pointes, perce le verre, et souvent le fait éclater autour du trou qu'elle a pratiqué (*). — De même, en plaçant entre les extrémités de deux tiges métalliques un morceau de bois bien sec, et en le faisant traverser par la décharge d'une batterie fortement chargée, on voit le bois se briser en éclats. C'est un effet semblable à celui que produit la foudre sur les troncs d'arbres.

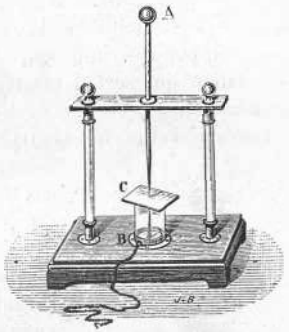


Fig. 484.
Expérience du perce-verre.

Pour faire passer la décharge d'une batterie *dans un liquide*, on dispose dans le liquide deux tiges métalliques A, B, isolées l'une de l'autre par un support en ébonite, et dont les extrémités sont réunies par un fil métallique (*fig.* 485). L'une des tiges étant en communication avec l'armature extérieure d'une batterie, on approche de l'autre un conducteur communiquant avec l'autre armature : la décharge qui se produit entre les extrémités des tiges volatilise le fil, et l'ébranlement communiqué au liquide est tel, que le verre est le plus souvent brisé.

Le passage de la décharge *dans un gaz* est encore accompagné d'un

(*) La décharge tend quelquefois à passer d'une pointe à l'autre, en contournant la lame de verre : aussi, pour assurer le succès de l'expérience, est-il bon d'introduire la pointe supérieure dans un corps mauvais conducteur, comme une goutte d'huile, ou mieux encore dans une petite masse de caoutchouc, appliquée sur le verre.

ébranlement violent ; mais l'élasticité du gaz lui permet de céder au efoulement produit par la décharge, comme un ressort auquel on imprime un choc. — La figure 486 représente le *mortier électrique* : quand on fait passer une décharge dans l'air qui remplit la cavité C, la balle B est vivement projetée.

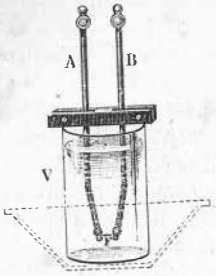


Fig. 485.
Torpille électrique.

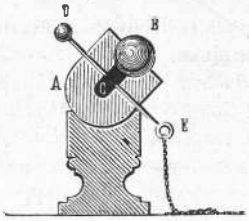


Fig. 486.
Mortier électrique.

704. Effets calorifiques. — L'étincelle de la machine électrique produit un dégagement de chaleur dans le gaz qu'elle traverse. — On peut le démontrer en plaçant redl'éther dans une cuillère métallique, et l'approchant de la machine llectrique : la chaleur dégagée par l'étincelle, à la surface du liquide, suffit pour enflammer le mélange d'air et de vapeur d'éther. — Si l'on drend une bouteille de Leyde chargée et si l'on applique une couche de coton-poudre, imprégnée de poussière de résine, sur la boule de éexcitateur qui sert à produire la décharge, on voit le coton-poudre prendre feu.

Lorsque l'étincelle électrique traverse un mélange d'hydrogène et d'oxygène, elle détermine la combinaison de ces deux gaz. — Le *pistolet de Volta* (*fig.* 487) est un flacon métallique A, dont la paroi laisse passage à une tige métallique DE (*fig.* 488), mastiquée dans un tube de verre qui l'isole. On introduit dans le vase un mélange d'hydrogène et d'oxygène, et on le ferme avec un bouchon B. On approche la boule D de de la machine électrique. L'étincelle qui jaillit entre l'extrémité E de la tige et la paroi, met le feu au mélange gazeux ; la combustion se propage instantanément dans toute la masse, et la vapeur d'eau produite acquiert, par l'élévation de température due à la combinaison chimique, une force élastique qui chasse le bouchon avec explosion.

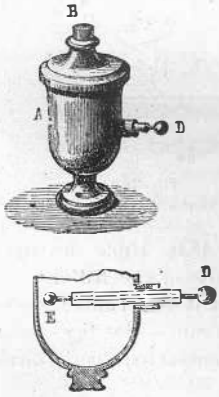


Fig. 487 et 488.
Pistolet de Volta.

Enfin, si l'on opère avec une batterie, et qu'on en fasse passer la décharge au travers d'un fil métallique, on arrive, selon le degré de finesse du fil, à le faire rougir, à le fondre, ou même à le réduire en vapeur. — On emploie, pour ces expériences, un appareil

désigné sous le nom d'*excitateur universel*, qui se compose de deux tiges métalliques supportées par des pieds de verre, et terminées par des boules (*fig.* 489). On tend entre les deux boules un fil de platine fin; au moment où l'on fait communiquer les tiges avec les armatures d'une batterie chargée, on voit le fil rougir et souvent même se fondre. — Si on le remplace par un fil de soie simplement *doré* à sa surface, la décharge laisse le fil de soie intact, et passe tout entière par la couche mince d'or : l'or est réduit en vapeur, et vient se déposer, en une poussière noirâtre, sur une feuille de carton placée derrière.

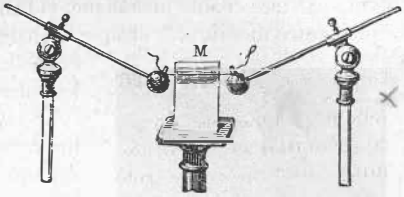


Fig. 489.
Passage d'une décharge dans un fil métallique.

Les choses se passent tout à fait de même dans l'expérience du *portrait de Franklin*. — Dans une feuille de carton mince B (*fig.* 490), on a pratiqué des découpures représentant le portrait de Franklin; on y applique une feuille d'or, entre les deux lames métalliques F et F′, et l'on rabat sur elle les deux feuilles de carton A et C. On place alors, en dessous du carton B, un morceau de soie blanche, et l'on maintient le tout fortement appliqué, en le mettant en presse entre deux plaques de bois P, comme on l'a représenté à droite. On fait alors passer la décharge d'une batterie entre les lames F et F′; la feuille d'or, volatilisée et projetée à travers la découpure, vient imprimer le portrait de Franklin sur la soie blanche.

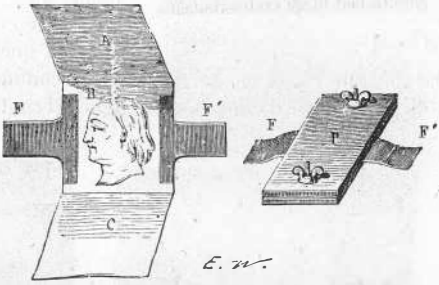


Fig. 490. — Expérience du portrait de Franklin.

705. Effets lumineux. — Nous avons donné le nom d'*étincelle électrique*, au phénomène lumineux qui se produit lorsqu'une décharge électrique traverse l'air.

Voici d'abord quelques dispositions qui permettent d'obtenir, avec

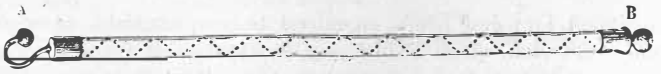


Fig. 491. — Tube étincelant.

une seule décharge, un grand nombre d'étincelles. — Le *tube étincelant*

(*fig.* 491) est un tube de verre, à l'intérieur duquel on a collé une série de petits losanges de clinquant, terminée de part et d'autre aux montures métalliques A, B. On fait communiquer l'une des montures avec le sol, par une chaîne métallique, et l'on approche de la machine électrique l'autre monture. A chaque décharge de la machine, on voit des étincelles jaillir à la fois dans tous les intervalles des losanges.

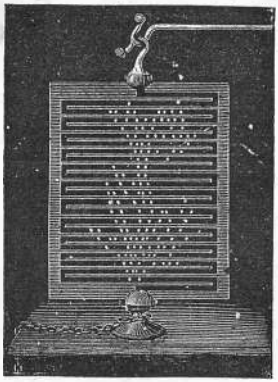


Fig. 492. — Carreau étincelant.

Le *carreau étincelant* (*fig.* 492) est un carreau de verre sur lequel est appliquée une petite bande d'étain, formant un grand nombre de zigzags : l'étain a été enlevé en un certain nombre de points, dont l'ensemble forme un dessin, celui d'une fleur par exemple. En opérant comme avec le tube étincelant, on voit apparaître le dessin représenté par une série d'étincelles.

706. Aspects divers de l'étincelle électrique. — Lorsqu'une machine électrique est en pleine activité, si l'on place, à quelques centimètres du collecteur, un corps conducteur mis en communication avec le sol, on obtient une série d'étincelles rectilignes et continues (*fig.* 493), d'un blanc

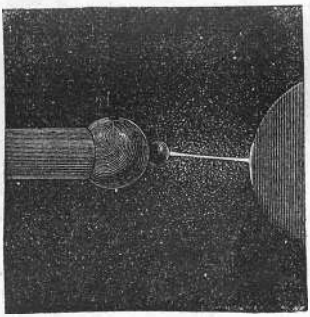


Fig. 493. — Étincelle rectiligne.

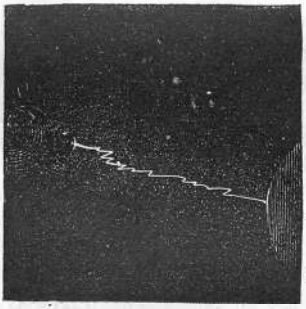


Fig. 494. — Étincelle en zigzag.

éblouissant. En même temps, on entend un bruit semblable au craquement d'une étoffe qu'on déchire. — A mesure qu'on augmente la distance, la continuité tend à disparaître, et l'on distingue une succession de décharges, nettement séparées. Chacune d'elles produit un sillon lumineux, brisé en zigzag (*fig.* 494), comme les éclairs qui sillonnent

le ciel par les temps d'orage (*). — Ces divers effets sont particulièrement faciles à obtenir avec les machines de Holtz ou de Wimshurst, en éloignant plus ou moins les deux pôles.

Quant à la couleur de l'étincelle, elle varie avec la nature des surfaces, généralement métalliques, entre lesquelles elle jaillit. En analysant le phénomène, on a pu constater en effet que l'éclat de la lumière est dû, en grande partie, à des parcelles métalliques arrachées aux conducteurs et portées à l'incandescence par la décharge elle-même.

707. Décharges dans les gaz raréfiés. — Lorsqu'on fait passer les décharges électriques dans un espace contenant un gaz raréfié, les étincelles tendent à prendre l'apparence de lueurs plus ou moins diffuses. — On remarque, en outre, que leur couleur dépend alors presque uniquement de la nature du gaz qu'elles traversent.

Pour observer ces phénomènes, on peut employer, par exemple, l'*œuf électrique* (*fig.* 495). C'est un vase de verre fermé par des montures métalliques, dont chacune porte une tige terminée à l'intérieur par une boule. Un canal pratiqué dans la monture inférieure, et muni d'un robinet, permet de raréfier le gaz à l'intérieur de l'appareil. — Pour faire passer les décharges, on peut faire communiquer la monture inférieure avec le sol, et approcher la monture supérieure de la machine électrique, de manière à en tirer des étincelles. — Quand on opère avec une machine de Holtz ou de Wimshurst, on met en communication chacune des montures de l'œuf avec l'un des conducteurs de la machine.

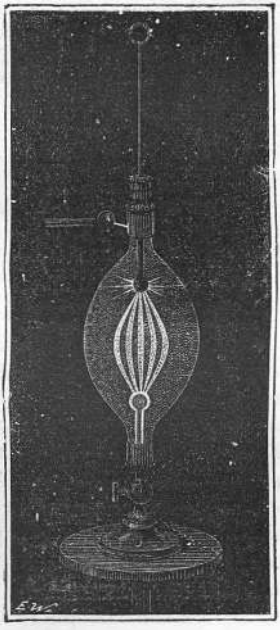


Fig. 495. — Œuf électrique; décharges dans un gaz raréfié.

Lorsque l'œuf électrique contient *de l'air* raréfié, à une pression de quelques centimètres, chaque décharge fait apparaître, entre les boules, des bandes lumineuses pourprées (*fig.* 495); on observe, en outre, que la boule négative est environnée, ainsi que sa tige, d'une lueur violacée. — Quand la pression n'est plus que de quelques millimètres, les bandes lumineuses se confondent en une sorte de gerbe ovoïde, partant de la boule positive, et s'arrêtant à une petite distance de la boule négative. —

(*) Lorsqu'une machine électrique fonctionne sans qu'il se trouve, en présence de ses conducteurs, aucun corps assez voisin pour qu'il se produise des étincelles, on observe,

Les différents gaz, à un degré suffisant de raréfaction, donnent des phénomènes analogues, avec des couleurs diverses (*).

Ces expériences tendent à prouver que l'électricité éprouve une résistance d'autant plus faible que la pression du gaz est plus petite ; mais d'autres expériences, et notamment celles de M. Gassiot, montrent que l'électricité ne peut pas traverser un vide absolu. — Pour répéter ces expériences, on emploie généralement la disposition représentée par la figure 496. Les bornes B et B′ étant mises en communication avec les deux pôles d'une machine électrique, les électricités contraires pourraient se recombiner par trois voies différentes : 1° à travers l'air, de la pointe P à la pointe P′ ; 2° à travers le gaz raréfié contenu dans le tube T′ ; 3° enfin, en franchissant un très petit intervalle, ménagé entre les deux fils de platine du tube T, dans lequel le vide a été poussé jusqu'aux dernières limites. L'expérience montre que la décharge ne franchit jamais ce petit intervalle.

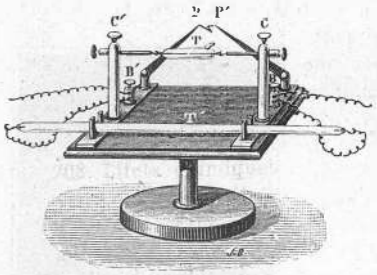


Fig. 496. — La décharge électrique ne traverse pas le vide.

En résumé, quand la force élastique d'un gaz diminue, la résistance qu'il offre au passage de l'électricité va d'abord en diminuant ; mais si la force élastique décroît au-dessous d'une certaine limite, la résistance croît très rapidement, et peut être considérée comme devenant infinie quand la force élastique est nulle.

708. Effets chimiques. — Lorsqu'une série d'étincelles électriques traverse un gaz composé, résultant de la combinaison exothermique de deux éléments, son effet le plus ordinaire est de décomposer lentement le gaz en ses éléments : une partie de l'énergie électrique mise en jeu dans les étincelles se retrouve, à l'état d'énergie potentielle, dans les éléments séparés (396). — On introduit du gaz ammoniac dans une éprouvette de verre A, placée sur le mercure (*fig.* 497) ; la paroi de l'éprouvette est traversée par deux petits fils de platine, dont les extrémités intérieures sont à une petite distance l'une de l'autre : en faisant communiquer ces fils avec les pôles d'une bobine de Ruhmkorff E, on fait passer au travers du gaz une série continue d'étincelles électriques. On constate que le volume du gaz augmente progressivement,

dans l'obscurité, des *aigrettes lumineuses* partant des divers points des conducteurs, et l'on entend un bruit sourd et saccadé. Ces aigrettes sont dues à des décharges de la machine vers les corps éloignés.

(*) Quand l'expérience est faite avec de l'*acide carbonique*, la lumière prend une teinte d'un blanc verdâtre. — Avec de l'*hydrogène*, la teinte devient d'un rouge foncé.

jusqu'à devenir double de ce qu'il était primitivement : le gaz s'est transformé en un mélange d'azote et d'hydrogène. — L'expérience

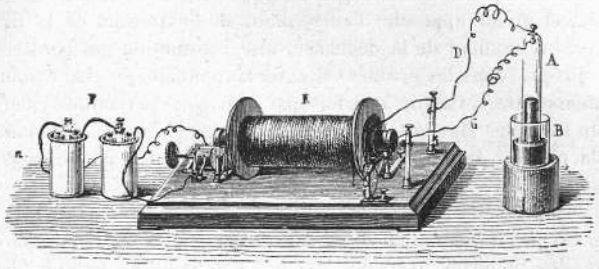


Fig. 497. — Décomposition du gaz ammoniac par une série d'étincelles électriques.

montre cependant que la décomposition n'est jamais totale; il reste toujours des traces de gaz ammoniac (*).

Inversement, une série d'étincelles électriques, en traversant un mélange de gaz simples, détermine la combinaison lente de ces deux gaz, lorsque cette combinaison est accompagnée d'une absorption d'énergie. — On introduit un mélange d'un volume d'azote et de deux volumes d'oxygène secs, dans un tube à deux branches plongeant dans deux petites cuvettes de mercure (*fig.* 498) : l'un des vases communique avec le sol par une petite chaîne de fer; l'autre, avec une machine électrique. Après le passage d'un grand nombre d'étincelles, on constate qu'il s'est formé des vapeurs rutilantes de peroxyde d'azote, composé endothermique (**).

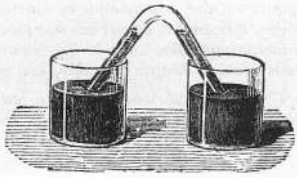


Fig. 498.
Combinaison de l'azote et de l'oxygène.

709. Effets physiologiques, ou commotions produites par les décharges. — Lorsqu'on tire une étincelle d'une machine électrique, on ne ressent qu'une légère piqûre, si la machine est faiblement chargée. Si la charge est plus forte, on éprouve une commotion dans le poignet ou dans le coude. — Ce sont là les effets qui se produisent, en général, quand le corps humain sert d'intermédiaire pour la produc-

(*) En plaçant, entre les deux conducteurs d'une machine de Holtz en activité, une bande de papier imprégnée de sulfate de sodium et colorée avec du sirop de violettes, on voit le papier rougir du côté positif et verdir du côté opposé. Le sel a donc été décomposé : son acide s'est porté à l'un des pôles, et sa base à l'autre.

(**) Dans l'expérience ainsi faite, la combinaison s'arrête dès qu'il s'est formé une certaine proportion de peroxyde d'azote. — Si l'on opère en présence de la potasse, qui absorbe progressivement le peroxyde d'azote, en formant de l'azotate et de l'azotite de potassium, la totalité des gaz entre en combinaison.

tion d'une décharge électrique, c'est-à-dire pour la combinaison brusque des électricités contraires (*).

Si l'on prend dans une main la panse d'une bouteille de Leyde chargée, et qu'on approche l'autre main de l'extrémité de la tige, on éprouve, au moment de la décharge, une commotion qui peut se faire sentir jusque dans les épaules et dans la poitrine. — La commotion peut même être ressentie à la fois par plusieurs personnes, placées à la suite les unes des autres et se tenant par la main, de manière à faire la chaîne; la première prend dans la main la panse de la bouteille, la dernière approche le doigt de la tige (**).

Les décharges de la bouteille de Leyde ne sont jamais dangereuses. Il n'en est pas de même de celles des batteries; on a pu, en chargeant de grandes batteries avec des machines puissantes, obtenir des décharges qui tuaient instantanément des animaux de grande taille. Aussi, ne saurait-on prendre trop de précautions, dans les expériences faites avec des batteries fortement chargées, pour éviter que les décharges passent par le corps de l'expérimentateur.

(*) Il ne se produit aucun effet de ce genre quand le corps humain se charge *lentement* d'électricité. — Un expérimentateur, placé sur un tabouret à pieds de verre, met la main sur le conducteur de la machine, avant qu'elle soit mise en activité : quand on fait fonctionner la machine, il éprouve seulement la sensation d'un souffle léger, qui semble courir sur son visage et sur ses mains. — Mais, si un second expérimentateur, placé sur le sol, vient à approcher la main du premier, ils éprouvent tous deux, à chaque étincelle, une commotion.

(**) Cette expérience fut faite par l'abbé Nollet, devant le roi Louis XV, sur une réunion de 500 gardes. — On ne manque jamais de la répéter dans nos Cours, avec une bouteille faiblement chargée, en y faisant participer tous les auditeurs.

Voir à la fin du volume, livre VI, *Météorologie*, ce qui concerne l'Électricité atmosphérique.

CHAPITRE

MAGNÉTISME

I. — PHÉNOMÈNES GÉNÉRAUX DU MAGNÉTISME.

710. Aimants naturels et aimants artificiels. — Substances magnétiques. — L'*aimant naturel* ou la *pierre d'aimant* (μάγνης) est un oxyde de fer naturel (*), dont certains échantillons possèdent la propriété d'attirer le fer et quelques autres métaux, comme le nickel, le cobalt, le chrome : cette propriété, connue dès l'antiquité, a reçu le nom de *magnétisme*. — On nomme *substances magnétiques*, les substances qui sont attirables par l'aimant.

Lorsqu'on exerce, avec un aimant, des frictions sur un barreau d'acier trempé (**), il acquiert et conserve la propriété d'attirer le fer ; il devient un *aimant artificiel*. Au contraire, le fer pur (*fer doux*), ne peut acquérir une aimantation permanente.

Les aimants artificiels présentent cet avantage, qu'on peut leur donner des formes appropriées à l'usage auquel ils sont destinés. C'est à ces aimants que nous aurons particulièrement recours.

711. Pôles des aimants. — Lorsqu'on plonge dans la limaille de fer un barreau aimanté, on voit s'attacher, autour de ses deux extrémités (*fig.* 499), des filament formés par des grains de limaille, juxta-

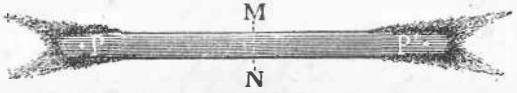


Fig. 499. — Barreau aimanté.

posés et serrés en houppes les uns contre les autres. Ils deviennent d'autant plus rares qu'on approche davantage de la ligne médiane MN, où ils disparaissent complètement. Les deux points P et P', vers les-

(*) C'est la combinaison qu'on désigne, en Chimie, sous le nom *d'oxyde magnétique*, et qu'on représente par la formule Fe^3O^4.

(**) L'acier est une combinaison de fer et d'une petite quantité de carbone. — L'opération de la *trempe* consiste à chauffer l'acier à une température plus ou moins haute, et à le refroidir ensuite brusquement, ce qu'on fait en général par une immersion dans l'eau froide. — Dans le procédé Clémandot, l'acier est d'abord chauffé au rouge cerise, et comprimé ensuite au moyen d'une presse hydraulique, qui développe une pression de 2000 à 3000 kilogrammes par centimètre carré. La trempe résulte alors des actions combinées de la compression et du refroidissement rapide au contact des plateaux métalliques de la presse.

quels convergent des filaments, et qui paraissent agir comme deux centres d'attraction, ont reçu le nom de *pôles*; la ligne médiane MN est la *ligne neutre* (*).

712. Spectre magnétique. — Si l'on place un barreau aimanté sous une feuille de carton horizontale, et si l'on fait tomber, au moyen d'un tamis, une pluie de limaille sur ce carton, on voit les grains se grouper de manière à dessiner le contour du barreau (*fig.* 500), surtout si l'on a soin d'imprimer au carton de petites secousses, pour permettre à la

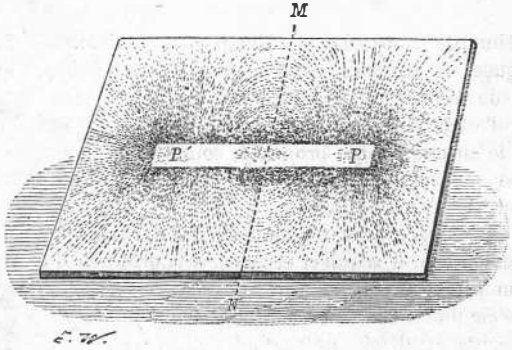


Fig. 500. — Spectre magnétique.

limaille de se déplacer à sa surface. Elle forme de longs filaments, dont les directions convergent vers les pôles; au-dessus de la ligne neutre, se trouve un peu de limaille, qui est demeurée là où elle était tombée; enfin, autour de cette région, les filaments se courbent en arcades, et viennent réunir les points symétriques des deux moitiés du barreau. — Une pareille figure est ce qu'on nomme un *spectre magnétique*.

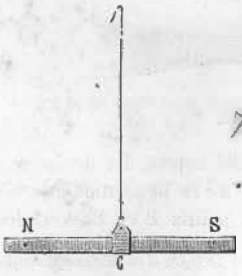


Fig. 501. — Action de la Terre sur un aimant.

713. Action de la Terre sur un aimant. — Distinction des deux pôles. — Un barreau aimanté étant suspendu horizontalement par un fil (*fig.* 501), et abandonné à lui-même, on le voit, après quelques oscillations, prendre une direction fixe, qui est à peu près celle du nord au sud, et à laquelle il revient toujours quand on l'en écarte. — Si l'on vient à retourner le barreau, de manière à placer du côté du nord le pôle qui s'était dirigé vers le sud,

(*) Il arrive parfois que les barreaux mal aimantés, ou les aimants naturels, au lieu d'offrir seulement deux pôles et une ligne neutre, présentent en outre, dans leur longueur, plusieurs centres d'attraction, qu'on appelle *points conséquents*; ces points sont séparés par des régions inactives. C'est là une irrégularité exceptionnelle.

et qu'on l'abandonne de nouveau, on le voit faire une demi-révolution, et revenir, après quelques oscillations, à sa position primitive. Cette dernière remarque montre que les deux pôles ne sont pas identiques : nous les nommerons provisoirement *pôle nord* et *pôle sud*.

714. Méridien magnétique. — Pour déterminer, avec plus de précision, la direction que prend la ligne des pôles d'un aimant mobile dans un plan horizontal, on peut employer une aiguille aimantée, formée d'une lame d'acier taillée en losange très allongé (*fig.* 502), et mobile sur un pivot vertical : en raison de la forme même de cette aiguille, la *ligne des pôles* coïncide toujours sensiblement avec la ligne des pointes (*). Dans la plupart des points du globe, la direction que prend une pareille aiguille n'est pas exactement celle du nord au sud : elle fait, avec la ligne nord-sud, un angle plus ou moins grand, qu'on appelle la *déclinaison* du lieu. — Nous reviendrons plus loin sur la mesure exacte de cet angle.

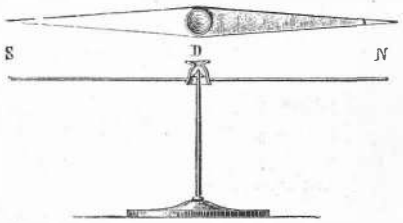


Fig. 502.

On appelle *méridien magnétique* le plan vertical qui passe par la ligne des pôles de l'aiguille, lorsqu'elle est en équilibre.

715. Actions réciproques des pôles de deux aimants. — Supposons que, par une expérience préliminaire, on ait déterminé le pôle nord N et le pôle sud S d'une aiguille, et de même les pôles N′ et S′ d'un barreau. Si l'on présente au pôle nord N le pôle nord N′ (*fig.* 503),

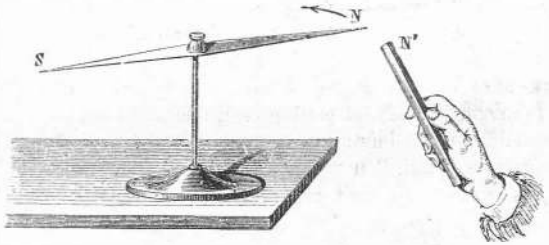


Fig. 503. — Actions réciproques des pôles de deux aimants.

on observe une répulsion ; de même, le pôle S′ repousse le pôle S. — Au contraire, le pôle nord N′ attire le pôle sud S.

(*) La moitié nord de l'aiguille se distingue ordinairement par une teinte bleu foncé. Cette teinte est due à une mince couche d'oxyde, formée sur l'acier pendant l'élévation de température qui a précédé la trempe : une fois l'aiguille aimantée, le constructeur enlève cette couche d'oxyde sur la moitié sud de l'aiguille.

Donc, *deux pôles de même nom se repoussent*, et *deux pôles de noms contraires s'attirent*.

Plaçons maintenant un barreau aimanté sur une table, et au-dessus de lui une aiguille sur son pivot (*fig.* 504). Nous voyons l'aiguille

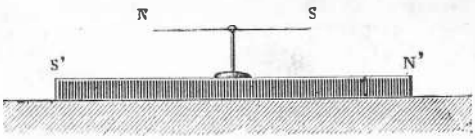


Fig. 504. — Action d'un barreau sur une aiguille placée au-dessus de lui.

prendre la même direction que le barreau, mais les pôles de l'aiguille se placent *en sens inverse* de ceux du barreau. — C'est bien ainsi que les choses doivent se passer, puisque ce sont les pôles de noms contraires qui s'attirent entre eux.

716. L'action de la Terre est assimilable à celle d'un aimant. — Cette dernière expérience permet de se faire une idée du genre d'action qu'exerce la Terre sur une aiguille aimantée, placée à sa surface. Cette aiguille, éloignée de tout autre aimant, prend une direction fixe : la Terre agit donc sur elle comme le ferait un aimant qui serait placé au-dessous d'elle, dans cette direction même, mais dont les pôles seraient disposés *en sens inverse* des siens.

On donne le nom d'*aimant terrestre* à cet aimant, dont on est ainsi conduit à imaginer l'existence au sein de la Terre. Nous supposerons l'aimant terrestre situé *au voisinage du centre du globe, à peu près dans la direction de la ligne des pôles géographiques* (*).

717. Origine des dénominations de pôle austral et de pôle boréal. — L'*aimant terrestre* étant supposé placé comme nous venons de le dire, l'un de ses pôles est dans l'hémisphère boréal (hémisphère nord), et peut prendre le nom de *pôle boréal*; l'autre est dans l'hémisphère austral (hémisphère sud), et peut prendre le nom de *pôle austral*. — Si maintenant on considère une aiguille aimantée, en équilibre à la surface du globe, et si l'on veut donner à ses deux pôles des dénominations semblables, on doit regarder les pôles de l'aiguille comme placés *en sens inverse* de ceux de l'aimant terrestre. On doit donc

(*) C'est l'observation même des phénomènes qui conduit à se représenter cet aimant comme placé *au voisinage du centre du globe*. — En effet, la direction d'une aiguille aimantée ne change pas sensiblement lorsque, l'ayant laissée se mettre en équilibre dans un lieu, on la transporte dans un autre lieu, à quelques kilomètres du premier : ce résultat ne peut se concevoir qu'en considérant l'aimant terrestre comme placé *très loin* de la surface de la région où les expériences sont faites. Comme il en est de même en quelque région du globe qu'on opère, l'aimant terrestre ne peut être placé qu'*à une très grande distance de tous les points de la surface du globe*, c'est-à-dire *vers le centre*.

nommer *pôle austral* de l'aiguille, celui qui se dirige vers le nord; *pôle boréal*, celui qui se dirige vers le sud.

C'est là, en effet, le système de dénominations le plus usité. Il est nécessaire d'en connaître l'origine, pour s'expliquer l'emploi de ces deux mots, *austral* et *boréal*, appliqués aux pôles d'une aiguille, dans un sens qui semble en opposition avec leur sens géographique (*).

718. Aimantation temporaire du fer, sous l'influence d'un aimant. — Prenons un petit barreau de fer pur, et, après avoir constaté qu'il n'attire pas la limaille de fer, mettons-le à une petite distance du pôle austral A d'un aimant (*fig.* 505). Ses extrémités acquièrent la propriété d'attirer la limaille de fer, c'est-à-dire que le petit barreau de fer *s'aimante*. — Pour savoir comment sont disposés ses pôles, on peut, sans le déplacer, approcher de son extrémité *a* le pôle austral d'une aiguille aimantée, mobile sur un pivot : on observe une répulsion, d'où l'on conclut que l'extrémité *a* contient un pôle *austral*. Nous nous contenterons de signaler ici ce résultat d'expérience, nous réservant d'en donner l'explication plus loin (729). — L'autre extrémité *b* contient un pôle *boréal*.

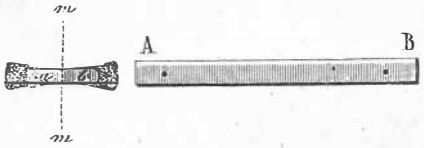


Fig. 505. — Aimantation temporaire du fer, sous l'influence d'un aimant.

Mais cette aimantation du fer n'est pas persistante : dès qu'on éloigne l'aimant influent AB, le barreau de fer revient à l'état neutre et abandonne la limaille qui s'y était fixée. — On donne au fer pur le nom de *fer doux*, pour le distinguer de l'acier, qui conserve l'aimantation une fois qu'il l'a acquise.

719. Attraction du fer doux par un aimant. — On comprend que, si le petit barreau de fer *ab* est abandonné à lui-même, à une petite distance de l'aimant AB, l'attraction exercée par le pôle A sur le pôle voisin *b* arrive à l'entraîner. Il s'attache alors à l'aimant, et y reste suspendu, si son poids n'est pas trop considérable.

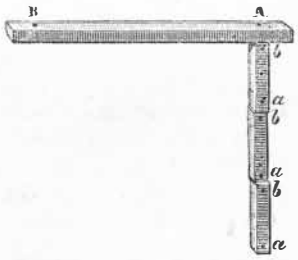


Fig. 506. — Attraction d'une série de barreaux de fer doux par un aimant.

Mais, le barreau de fer étant maintenant devenu un aimant, on peut lui en présenter un second, sur lequel il agit à son tour de la même manière, et ainsi de suite. — C'est par une succession d'actions semblables, qu'on peut suspendre au pôle d'un aimant

(*) On emploie, dans la marine, les expressions d'*extrémité nord* et *extrémité sud*, qui ne donnent lieu à aucune ambiguïté.

(*fig.* 506) une série de morceaux de fer doux, dont chacun s'aimante sous l'influence de celui qui le précède. — Cependant les morceaux de fer successifs prennent une aimantation de plus en plus faible, et ils cessent bientôt d'en pouvoir soutenir de nouveaux.

C'est ainsi encore que les grains de limaille de fer s'attachent les uns aux autres, autour des pôles d'un aimant (*fig.* 499).

720. Aimantation permanente de l'acier. — Force coercitive. — Un barreau d'acier trempé, placé dans les mêmes conditions que le barreau de fer doux *ab* (*fig.* 505), ne manifeste d'abord aucune trace d'aimantation : ce n'est qu'au bout d'un temps assez long qu'on peut voir s'y développer des pôles. Mais, une fois que l'acier a acquis une aimantation appréciable, il la conserve, après qu'on a éloigné l'aimant qui avait servi à la développer.

Cette résistance qu'oppose l'acier, à l'apparition et à la disparition de l'aimantation, a reçu le nom de *force coercitive*.

721. Expérience des aimants brisés. — Prenons une aiguille d'acier aimantée AB (*fig.* 507), et plongeons-la dans la limaille de fer, de manière

Fig. 507. — Expérience des aimants brisés.

à constater que la limaille s'attache seulement à ses deux extrémités, et que son milieu N est une ligne neutre ; approchons-la ensuite d'une aiguille aimantée, afin de distinguer le pôle austral A et le pôle boréal B. Cela fait, brisons l'aiguille au point N : chacun des deux fragments attire la limaille de fer par ses deux extrémités, et l'on peut constater que le fragment de gauche a un pôle austral en A, un pôle boréal en B′, et une ligne neutre en son milieu ; le fragment de droite a, de même, un pôle austral en A′, un pôle boréal en B, et une ligne neutre en son milieu. — Brisons encore l'un de ses fragments en deux parties : chacun des fragments partiels devient encore un aimant complet, dont les pôles sont distribués comme l'indique la figure. — Il en est toujours de même, quelque loin qu'on pousse la division des fragments.

Cette expérience conduit, comme on va le voir, à envisager la constitution des aimants d'une façon qui rend compte de toutes leurs propriétés.

722. Constitution des aimants. — D'après l'expérience qui précède, et en considérant la segmentation poussée jusqu'à la dernière limite, on doit considérer chaque molécule d'un aimant comme étant elle-même un aimant complet, possédant un pôle magnétique austral et

un pôle magnétique boréal. — Dans un barreau d'acier *non aimanté*, ou dans un barreau de fer doux *à l'état neutre*, il suffit d'admettre que les petits aimants élémentaires sont orientés *dans tous les sens*, pour concevoir que la résultante de leurs actions sur un point extérieur soit nulle. — D'autre part, si l'on admet que l'*aimantation* d'un barreau a pour effet d'orienter ses petits aimants élémentaires *dans un sens déterminé*, nous allons montrer que cette orientation suffit pour donner au système les propriétés constatées par l'expérience.

Considérons une série de molécules, identiques entre elles, M, M′, M″, M‴, M⁗ (*fig.* 508), orientées de façon que les lignes des pôles *ab*,

Fig. 508.

$a'b'$, $a''b''$, $a'''b'''$, $a''''b''''$, soient dirigées suivant une même ligne, droite ou courbe, et que les molécules voisines se regardent par leurs pôles contraires. L'action de ce *filet magnétique uniforme*, sur un point extérieur, se réduit à celle des pôles extrêmes *a* et b''''; en effet, dans toute la longueur du filet, les actions exercées sur un point extérieur par deux pôles en regard, tels que *b* et a', se neutralisent, en raison de la grandeur de la distance de ce point, par rapport aux intervalles intermoléculaires. — L'action de ce filet uniforme se réduit donc aux actions de *deux quantités égales de magnétisme libre*, austral et boréal, qui seraient placées aux extrémités *a* et b'''' du filet.

Si maintenant on considère un barreau aimanté, de forme prismatique, la manière la plus simple d'envisager sa constitution semblerait être de le supposer formé de filets magnétiques rectilignes, parallèles à son axe, et aboutissant à ses bases. Mais, s'il en était ainsi, l'action du barreau se réduirait à celle de deux couches de magnétisme libre, austral et boréal, réparties sur les deux bases; par suite, les centres d'attraction pour la limaille de fer devraient se trouver *sur les bases mêmes* du barreau. Or l'expérience montre que ces deux points sont toujours à une certaine distance des bases. — On conçoit en effet que, en raison de la répulsion qui s'exerce entre les pôles de même nom des filets voisins, les filets magnétiques doivent *diverger les uns par rapport aux autres*, au voisinage de leurs extrémités (*fig.* 509).

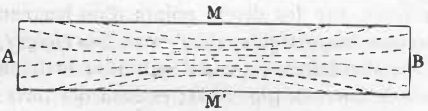


Fig. 509.

On pourra donc, en définitive, considérer l'action exercée par un aimant AB sur un point extérieur, comme résultant des actions de *deux*

couches de magnétisme libre, austral et boréal, réparties respectivement sur les deux moitiés de sa surface MAM′ et MBM′ (*).

723. Distribution du magnétisme libre dans un barreau aimanté — On ne connaît aucun procédé qui permette de déterminer rigoureusement la distribution du magnétisme libre dans les divers points d'un barreau aimanté. Mais on conçoit que, pour un barreau rectiligne, le nombre des filets magnétiques qui aboutissent en chaque point de la surface du barreau doit être d'autant plus grand, *par unité de surface*, que le point considéré est plus rapproché de l'extrémité. — En d'autres termes, si l'on représente les quantités de magnétisme libre, aux différents points d'un barreau rectiligne AB (*fig.* 510), par des perpendiculaires élevées sur l'axe du barreau, dans un même plan, et d'un côté ou de l'autre de l'axe suivant que le magnétisme libre est austral ou boréal, la courbe obtenue en joignant les extrémités de ces perpendiculaires doit présenter une forme telle que *aMb*.

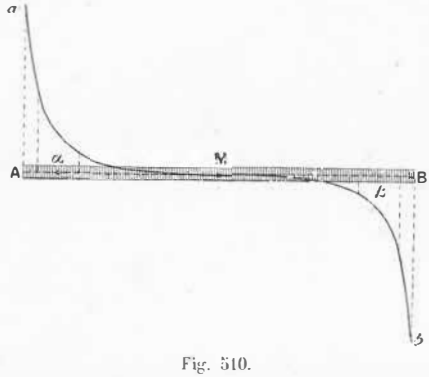


Fig. 510.

C'est ce qui a été vérifié approximativement par Coulomb et par d'autres expérimentateurs, en étudiant successivement l'action exercée par chacune des régions d'un long barreau aimanté, sur une petite aiguille aimantée, ou sur un barreau de fer doux, à une distance assez petite pour qu'on pût considérer comme négligeables les actions des autres régions.

724. Définition précise des pôles d'un aimant. — Les actions exercées sur les divers points d'un barreau aimanté, par un centre d'action magnétique extérieur et *très éloigné*, sont proportionnelles aux perpendiculaires qui représentent la distribution du magnétisme libre dans le barreau (*fig.* 510) ; ce sont des forces qui sont toutes parallèles entre elles : attractives pour la moitié boréale du barreau, par exemple ; répulsives pour la moitié australe. — Or, la résultante de toutes les forces attractives est une force égale à leur somme, parallèle à leur direction commune, et dont le point d'application sur l'axe du barreau est indépendant de cette direction (16), c'est-à-dire de la position du centre magnétique extérieur. Il est également indépendant de l'intensité magnétique

(*) Une théorie complète montre que, en outre des filets magnétiques dont les extrémités aboutissent à la surface de l'aimant, il peut encore se trouver des filets magnétiques terminés à l'intérieur même du barreau.

de ce centre d'action, puisqu'il ne dépend que des rapports de grandeur des forces, et non de leur valeur absolue (16). On peut donc appeler *pôle boréal* d'un barreau, le point β par lequel passe constamment la résultante des actions exercées sur tous les points de sa moitié boréale par un centre magnétique *très éloigné*, quelles que soient la position et l'intensité de ce centre. — Le *pôle austral* α est le point par lequel passe constamment la résultante des forces parallèles aux précédentes, mais de sens contraire, qui sont appliquées aux divers points de la moitié australe du barreau.

Dans le calcul des actions exercées sur le barreau par un centre magnétique éloigné, on pourra toujours supposer que tout le magnétisme austral libre du barreau est réuni au point α, et que tout le magnétisme boréal libre est réuni au point β. Or, l'expérience montre que l'action exercée sur un barreau aimanté par un centre magnétique extérieur, assez éloigné par rapport à la longueur du barreau pour qu'il puisse être considéré comme placé *à l'infini*, se réduit toujours à celle *d'un couple*. Les forces de ce couple, d'après ce qui précède, sont appliquées aux points α et β; de l'égalité de ces deux forces, on doit conclure que les quantités de magnétisme libre austral et boréal sont égales, ce qui est conforme à l'idée que nous avons donnée de la constitution des aimants (722).

Il n'en serait évidemment pas de même de l'action d'un centre magnétique dont la distance aux divers points du barreau serait peu considérable, c'est-à-dire du même ordre de grandeur que la longueur du barreau lui-même.

725. Énoncé des lois des attractions et répulsions magnétiques. — Coulomb a déterminé, par l'expérience, la loi suivant laquelle varient les attractions ou les répulsions qui s'exercent entre les extrémités de deux barreaux aimantés, placées successivement à différentes distances, ces distances étant toujours assez grandes pour que les pôles puissent être considérés comme satisfaisant à la définition précédente. — Il a été conduit aux lois suivantes :

Les forces répulsives qui s'exercent entre deux pôles de même nom sont en raison inverse des carrés des distances. — Les forces *attractives*, entre deux pôles de noms contraires, sont soumises à la même loi.

726. Balance de torsion. — Pour déterminer la loi des répulsions magnétiques, Coulomb a employé une balance de torsion (*fig.* 511), analogue à celle qui lui avait servi pour l'étude des répulsions électriques (642), mais ici la cage de la balance est de forme cubique; aussi, les divisions tracées sur les parois de la cage ne sont-elles pas égales : elles correspondent à des angles égaux. On oriente la ligne 0-180 dans la direction du méridien magnétique.

On commence par régler l'appareil de manière qu'un barreau aimanté, placé dans la chappe *m*, se tienne en équilibre dans le méridien magnétique *sans torsion du fil*. Pour cela, on remplace le barreau par une règle de bois ou de cuivre; on soulève le bouton *h* auquel est suspendu le fil, et, en le

faisant tourner sur lui-même, on amène la règle en équilibre suivant la ligne 0-180 : le fil n'éprouve alors évidemment aucune torsion. Si l'on substitue à la règle le barreau aimanté *ab*, l'action de la Terre tend à le maintenir dans cette même direction, sans torsion du fil.

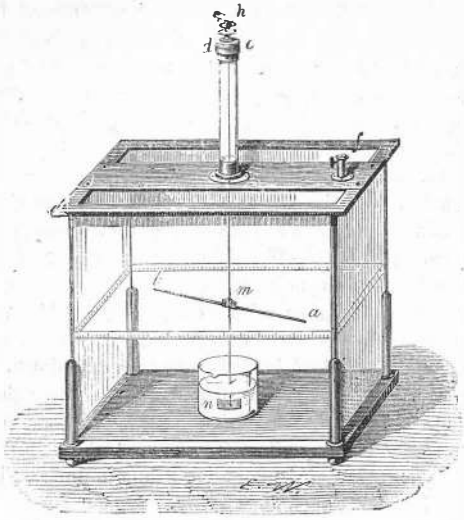


Fig. 511. — Balance de torsion.

On détermine, par des expériences préliminaires, les valeurs de la torsion qu'il faut imprimer au fil pour écarter plus ou moins le barreau du méridien magnétique. On trouve que, pour des écarts suffisamment petits, les valeurs de la torsion qui fait équilibre à l'action de la Terre sont proportionnelles aux angles d'écart.

On fixe alors verticalement un second aimant dans la douille *f*, de manière que son pôle austral prenne exactement la place primitivement occupée par le pôle *a*. La répulsion qui s'exerce entre ces deux pôles ayant écarté le barreau mobile, on tord progressivement le fil en sens contraire, à sa partie supérieure, de manière que l'équilibre s'établisse, d'abord pour une distance *d* entre les deux pôles, puis pour une distance *moitié moindre*. Dans chacun des cas, pour arriver à l'évaluation de la force répulsive qui s'exerce entre les deux pôles, il faut ajouter, à la torsion qu'on a imprimée au fil, la torsion qui correspond à l'action de la Terre, pour la position actuelle du barreau. — On trouve que, dans le second cas, la force répulsive est *quatre fois plus grande* que dans le premier, ce qui vérifie la loi du carré des distances (725).

727. Masses magnétiques. — Unité de masse magnétique. — Étant donnés deux aimants, nous considérerons le *rapport des masses magnétiques* réunies à leurs pôles, comme défini par le *rapport des forces répulsives* qu'on observera, quand on présentera successivement le pôle austral A de l'un, puis le pôle austral A′ de l'autre, à un même pôle austral *a*, placé à une distance constante.

Il résulte de cette définition que, si le pôle austral A d'un aimant est en présence du pôle austral A′ d'un autre aimant, à une distance déterminée, la force répulsive sera proportionnelle à la masse magnétique du premier, et évidemment aussi à la masse magnétique du second ; c'est-à-dire qu'elle sera proportionnelle au *produit des deux masses magnétiques*.

Quant au choix de l'*unité de masse magnétique*, la convention la plus simple consiste à prendre comme unité la masse magnétique d'un pôle qui, *en présence d'un pôle identique, placé à l'unité de distance*, donnera une force répulsive égale à l'*unité de force*. — Dans le système C.G.S., l'unité de masse magnétique sera la masse qui, en présence d'une masse identique, à une distance d'*un centimètre*, donnera une force répulsive égale à *une dyne*.

Dans ce système, si deux pôles, de masses magnétiques respectivement égales à m et m' unités, sont en présence à une distance de r centimètres, leur action mutuelle, exprimée en dynes, sera représentée, en tenant compte de la loi des distances (725), par la formule

$$f = \frac{mm'}{r^2};$$

la force f sera positive ou négative, c'est-à-dire répulsive ou attractive, selon que m et m' seront de même signe ou de signes contraires.

728. Moment magnétique d'un aimant. — Intensité d'aimantation. — On ne sait évaluer rigoureusement, ni la masse magnétique m de chacun des pôles d'un aimant, ni la distance $2a$ qui les sépare; mais on peut évaluer avec précision, comme nous allons le montrer, la valeur du produit $m \times 2a$. — C'est ce qu'on appelle le *moment magnétique* de l'aimant.

Considérons un barreau aimanté, suspendu horizontalement par un fil métallique (*fig.* 501) de manière qu'il ne puisse que tourner horizontalement autour de son point de suspension. L'action de la Terre tend à le placer dans le méridien magnétique; mais on pourra toujours, en tordant suffisamment le fil par sa partie supérieure, amener le barreau dans une direction *perpendiculaire au méridien magnétique*. — Dans cette position, si l'on désigne par H la composante horizontale de la force produite par l'action de la Terre sur l'unité de masse magnétique, on doit considérer le barreau comme sollicité par un couple, dont les forces, appliquées respectivement à ses deux pôles, ont chacune pour valeur $m \times H$, et dont le bras de levier est la distance $2a$ des pôles; le moment de ce couple est donc $mH \times 2a$. Or ce couple est équilibré par le couple qui est dû à la torsion du fil, et dont le moment est proportionnel à l'angle dont il a fallu tordre le fil à sa partie supérieure (*). Donc, si H est connu dans le lieu où l'on opère, et si l'on connaît le moment du couple de torsion pour une torsion de 1°, on en déduira le *moment magnétique* du barreau $M = m \times 2a$. — Chaque aimant, en particulier, pourra être caractérisé par son moment magnétique : en un même lieu, divers aimants, placés comme il a été

(*) La mesure de l'angle de torsion est particulièrement facile, si l'on fait l'expérience en suspendant le barreau dans la balance de Coulomb (726).

dit, seront sollicités par des couples dont les moments seront proportionnels aux moments magnétiques des aimants eux-mêmes.

Nous appellerons *intensité d'aimantation* d'un barreau aimanté le quotient $\frac{M}{v}$ de son moment magnétique par son volume. — Cette expression caractérise, en effet, le degré d'aimantation du barreau : à volume égal, plus le moment magnétique est grand, plus l'aimantation est intense.

729. Champ magnétique. — Lignes de force. — Intensité du champ en un point. — On appelle *champ magnétique* d'un aimant, ou d'un système d'aimants, la région de l'espace dans laquelle une masse magnétique australe, qu'on y supposerait placée, éprouverait une action la sollicitant à se déplacer. — La *force magnétique*, en un point déterminé du champ, est la force qui solliciterait l'*unité de masse magnétique australe*, supposée placée en ce point. C'est la grandeur de cette force qui caractérise l'*intensité du champ* au point considéré.

Quand un corps magnétique, tel qu'un petit barreau de fer doux *ab* (*fig.* 505), est placé dans le champ d'un aimant AB, les aimants élémentaires de ce petit barreau s'orientent de façon que, pour chacun d'eux, la ligne qui joint leurs pôles se dirige dans le sens de la force magnétique : le fer doux s'aimante ainsi par influence, et acquiert deux pôles *a*, *b*, disposés de telle sorte que la ligne *ba* donne la *direction* et le *sens* de la force magnétique, au point de l'espace occupé par ce petit barreau de fer doux.

Si l'on considère le spectre magnétique produit par un barreau aimanté (*fig.* 500), les filaments de limaille prennent, en chaque point, la direction de la force magnétique; c'est pourquoi les lignes dessinées par ces filaments ont reçu de Faraday le nom de *lignes de force*. — Les spectres magnétiques peuvent aussi servir à déterminer la forme des lignes de force, dans un champ magnétique produit par un système quelconque d'aimants.

Pour explorer un champ magnétique, c'est-à-dire pour déterminer à la fois la direction, le sens et la grandeur de la force magnétique en ses divers points, on pourra employer une aiguille aimantée très courte, mobile autour de son centre de gravité, de manière que la pesanteur n'ait sur elle aucune action. — En chaque point du champ, la position d'équilibre de l'aiguille donnera la *direction* et le *sens* de la force magnétique en ce point : ce seront ceux de la droite menée de son pôle boréal à son pôle austral. — Quant à la *grandeur* de la force magnétique, qui caractérise l'intensité du champ au point considéré, on conçoit qu'elle sera d'autant plus grande que l'aiguille, écartée de sa position d'équilibre, effectuera des oscillations plus rapides. De là, une méthode analogue à celle qui sert à mesurer l'intensité de la pesanteur, en un lieu déterminé, par l'observation des oscillations d'un pendule (58).

II. — MAGNÉTISME TERRESTRE.

730. Champ magnétique terrestre. — En un point quelconque de la Terre, un aimant mobile autour de son milieu, et éloigné de tout autre aimant, s'oriente dans une direction déterminée (715) : il existe donc, autour de la Terre, un champ magnétique.

On a déterminé, par la méthode qui vient d'être indiquée (729), la direction, le sens et la grandeur de la force magnétique terrestre, en divers lieux de la surface du globe. — L'ensemble des observations conduit à assimiler grossièrement le champ magnétique terrestre à celui que produirait un aimant placé au centre du globe et orienté du nord au sud : c'est ce que nous avions déjà indiqué (716). Cet aimant, ainsi placé à l'intérieur du globe, dans une région où la température doit être extrêmement élevée, ne saurait être considéré comme une réalité ; mais l'hypothèse de l'*aimant terrestre* est d'un emploi commode, pour l'interprétation des phénomènes. — C'est ce que nous allons constater en étudiant, par exemple, l'action exercée par la Terre sur un aimant complètement mobile, placé à sa surface.

731. L'action exercée par l'aimant central terrestre, sur un aimant placé à la surface du globe, doit être simplement directrice. — La distance de chacun des pôles de l'aimant terrestre à une aiguille aimantée *ab* (*fig* 512), placée à la surface du globe, doit toujours être considérée comme très grande par rapport à la longueur de l'aiguille. Dès lors, d'après ce qu'on a vu (724), l'action exercée sur l'aiguille par le pôle boréal de l'aimant terrestre doit se réduire à un couple, dont les forces aC, bC' seront appliquées respectivement au pôle austral a et au pôle boréal b de l'aiguille. — De même, l'action du pôle austral de l'aimant terrestre doit se réduire à un couple, dont les forces aD' et bD sont appliquées aux mêmes points. — Or, les forces aC et aD', appliquées au point a, ont une résultante aR, représentée en grandeur et

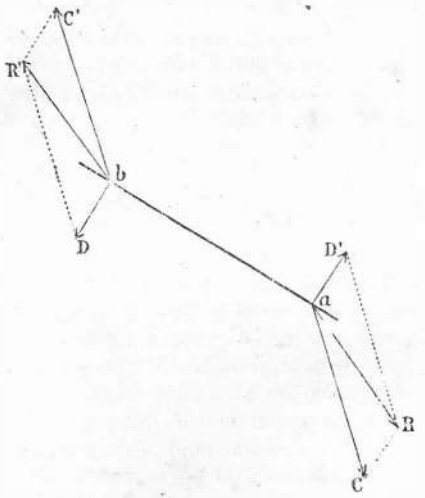


Fig. 512.

en direction par la diagonale du parallélogramme construit sur ces deux forces. Il en est de même des forces bC' et bD, appliquées en b. Les deux parallélogrammes étant égaux, et ayant leurs côtés parallèles deux à deux et dirigés en sens contraires, leurs diagonales sont égales, parallèles et dirigées en sens contraires, c'est-à-dire que les deux résultantes aR et bR' forment *un couple*. — Donc l'action d'un aimant central terrestre ne doit tendre qu'à faire tourner l'aiguille, de manière à la placer *dans une direction déterminée*, sans lui imprimer de mouvement de translation.

732. Vérifications expérimentales. — Les expériences suivantes permettent de vérifier que l'action de la Terre ne tend, en effet, à imprimer à un aimant aucun mouvement de translation.

1° Si l'on fixe une aiguille aimantée sur un disque de liège, flottant à la surface de l'eau, on voit cette aiguille tourner autour de son milieu, de manière à prendre une orientation déterminée, mais on n'observe jamais de mouvement *de translation* du disque vers un autre point du liquide (*). — Donc l'action de la Terre ne développe aucune force tendant à produire un mouvement *horizontal* de translation.

2° Si l'on détermine le poids d'une aiguille avant de l'aimanter, et qu'on le détermine de nouveau après l'aimantation, on constate qu'il est resté le même. — Donc l'aimantation ne développe aucune force *verticale*, agissant sur l'aiguille.

De ces deux expériences, on doit conclure que l'action de la Terre ne donne lieu non plus à aucune force tendant à entraîner l'aiguille dans une direction *oblique* par rapport à l'horizon. En effet, cette force, si elle existait, pourrait être décomposée en deux autres, l'une horizontale, l'autre verticale, et les deux expériences précédentes ont montré qu'il n'y a de composante dans aucune de ces deux directions.

733. Déclinaison et inclinaison. — L'action magnétique de la Terre sur un aimant se réduisant à un couple, si l'on pouvait suspendre une aiguille aimantée par son centre de gravité, et lui donner une mobilité parfaite autour de ce point, la ligne des pôles prendrait, en chaque lieu, une direction qui serait précisément celle des forces du couple, c'est-à-dire celle de la force magnétique due à l'action de la Terre. Dans la pratique, il est impossible de réaliser un pareil mode de suspension; on détermine alors la direction des forces du couple terrestre, au moyen de deux aiguilles, assujetties chacune d'une manière particulière, comme nous allons l'indiquer.

1° Soit un aimant ab, mobile *dans un plan horizontal*, autour d'un axe vertical ZZ' (*fig.* 515), et supposons cet aimant orienté d'abord

(*) Lorsqu'on réalise cette expérience, il est rare que les trépidations imprimées accidentellement au vase ne portent pas le disque vers tel ou tel point de son contour. Mais la direction dans laquelle l'aiguille se transporte varie d'une expérience à une autre, en sorte que ce mouvement de translation n'a aucun rapport avec l'effet que pourrait produire une action magnétique.

d'une manière quelconque. Chacune des deux forces qui le sollicitent, la force T, par exemple, peut se décomposer en deux autres, l'une V verticale, l'autre H horizontale et située dans le même plan que T et V. La force T′ se décomposera de même en deux autres, V′ et H′, qui seront respectivement égales et parallèles à V et H, mais dirigées en sens con-

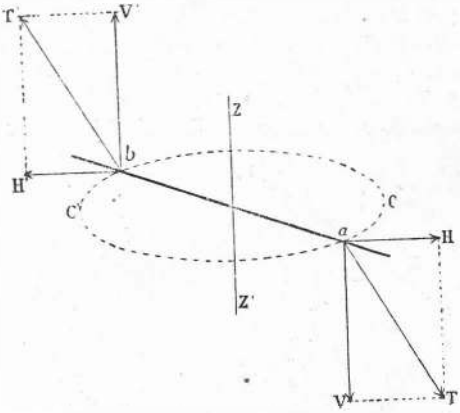


Fig. 513.

traire. En d'autres termes, le couple des forces T et T′ se décompose en un couple de forces verticales V et V′, et un couple de forces horizontales H et H′. — Les forces verticales V et V′ n'ont d'autre effet que d'appuyer sur les supports de l'axe ZZ′; au contraire, les forces horizontales H et H′ doivent faire tourner l'aimant autour de cet axe, jusqu'à ce qu'il se place, en équilibre, dans leur direction. — On appelle *méridien magnétique* d'un lieu, le plan vertical qui passe par la ligne des pôles d'un semblable aimant en équilibre (714); or ce plan contient les forces T et T′; donc, en chaque point du globe, le méridien magnétique est *le plan des forces du couple terrestre* en ce point.

On définit, en général, la direction du méridien magnétique d'un lieu, par la *déclinaison*, c'est-à-dire par l'*angle dièdre que fait le méridien magnétique avec le méridien géographique*. Cet angle a pour mesure l'angle plan que fait une aiguille aimantée, mobile dans un plan horizontal, avec la méridienne du lieu. — La déclinaison d'un lieu est dite *orientale* ou *occidentale*, selon que le pôle austral de l'aiguille se porte à l'est ou à l'ouest du méridien géographique. — L'appareil qui sert à la mesurer prend le nom de *boussole de déclinaison*.

2° Soit maintenant une autre aiguille aimantée, mobile *dans un plan vertical, autour d'un axe horizontal passant par son centre de gravité*. — Si l'on oriente ce plan dans le méridien magnétique, il contiendra

les forces du couple terrestre T et T′; et, comme la pesanteur ne peut exercer aucune action sur l'aiguille, la direction dans laquelle se fixera la ligne des pôles sera celle *de ces forces elles-mêmes*.

L'expérience montre que, dans la plupart des points du globe, une aiguille ainsi assujettie s'incline de manière à faire un certain angle avec l'horizon. — On nomme *inclinaison* d'un lieu, l'*angle aigu que fait la moitié australe d'une aiguille aimantée, mobile dans le méridien magnétique, avec la ligne horizontale menée par son centre dans le plan de ce méridien*. — L'appareil qui sert à mesurer cet angle prend le nom de *boussole d'inclinaison*.

734. Boussole de déclinaison. — Une aiguille aimantée est placée dans une boîte circulaire en cuivre rouge B (*fig.* 514), sur un pivot situé au centre du cercle divisé *ee′*; pour empêcher l'aiguille de s'incliner sur l'horizon, on a surchargé légèrement sa moitié boréale. — Deux montants verticaux de cuivre rouge O,O′, supportent l'axe de rotation AA′ d'une lunette L, lequel est parallèle au plan *ee′*; lorsqu'on fait tourner la lunette autour de cet axe de rotation, son axe optique décrit un plan qui est perpendiculaire au plan du cercle *ee′* et qui passe par le zéro de la graduation. — L'ensemble de la boîte et des supports peut tourner autour d'un axe passant par le centre du cercle *ee′* et par le centre de rotation de la lunette. Au contraire, le cercle CC′, qui entoure la boîte et qui lui est concentrique, est fixé au pied H; on lui donne le nom de *cercle azimutal*.

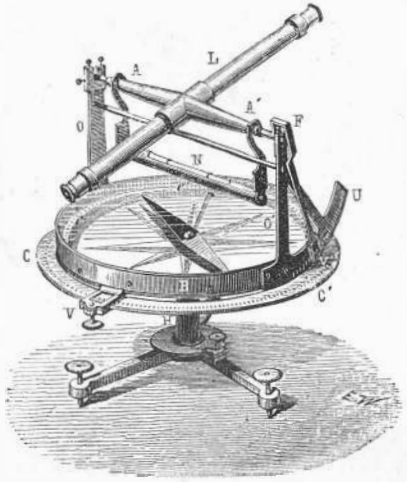


Fig. 514. — Boussole de déclinaison.

Lorsqu'on veut déterminer la déclinaison d'un lieu, on *règle* d'abord l'instrument de manière que l'axe autour duquel peut tourner le système des pièces mobiles soit bien vertical : il suffit, pour cela, de faire tourner tout ce système sur le pied H, et de s'assurer, à l'aide du niveau à bulle d'air N, que l'horizontalité de l'axe AA′ est toujours conservée. — Cela fait, si l'on opère dans un observatoire aux environs duquel soient disposées des mires indiquant la direction du méridien géographique, on peut immédiatement, en visant ces mires avec la lunette, orienter la boîte B de façon que l'axe optique de la lunette

et par suite le zéro du cercle *ee'* se placent dans ce méridien. La division du cercle à laquelle s'arrête alors l'extrémité australe de l'aiguille fait connaître la déclinaison du lieu (*).

On verra plus loin (*Météorologie*) que la déclinaison éprouve, en un même lieu, des variations lentes avec le temps. — A Paris, la déclinaison, en janvier 1892, était de 15° 30′,7.

735. Méthode du retournement de l'aiguille. — Nous avons supposé jusqu'ici que la ligne des pôles coïncidait avec la ligne qui joint les deux pointes de l'aiguille. Cette condition n'est pas toujours exactement réalisée ; voici comment on peut corriger les erreurs qui résulteraient de ce défaut de coïncidence.

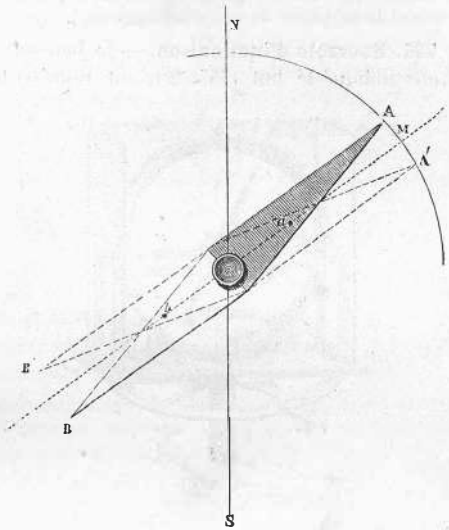


Fig. 515.

Soit NS (*fig.* 515) la méridienne géographique, et supposons que l'aiguille de la boussole se soit arrêtée dans une position d'équilibre AB ; si les pôles *a* et *b* sont situés hors de la ligne des pointes, la valeur réelle de la déclinaison est exprimée par l'arc NM, compris entre la méridienne et la ligne des pôles : donc, dans ce cas, l'arc observé NA serait trop petit. — Enlevons l'aiguille de son pivot, et retournons-la, de manière que la face qui se trouvait en dessus se trouve en-dessous ; la ligne des pointes, placée maintenant de

(*) Les conditions dans lesquelles nous nous sommes placés, pour simplifier l'exposé de la méthode, sont tout à fait exceptionnelles : en général, on détermine directement, *avec l'instrument lui-même*, le méridien géographique du lieu où se fait l'observation. — Il suffit, pour cela, de viser avec la lunette L un astre connu, ce qui amène le plan vertical de la lunette à coïncider avec le plan vertical qui, au moment de l'observation, contient l'astre. On fait ensuite tourner la boîte B d'un angle égal à l'angle que forme, à l'heure vraie de l'observation, le vertical de l'astre avec le méridien astronomique du lieu ; l'angle de rotation de la boîte peut d'ailleurs être mesuré avec précision au moyen du vernier V, qui parcourt le cercle azimutal. Le plan vertical qui passe par l'axe de la lunette et par le zéro de la graduation est ainsi amené dans le méridien géographique.

On voit sur la figure 514 un arc de cercle U, parcouru par un vernier V', qui est entraîné dans les mouvements de rotation de la lunette autour de son axe. — Cette pièce est destinée à donner l'*heure vraie*, au moment de l'observation, lorsqu'on ne peut pas la connaître d'une autre manière : la position du vernier sur ce cercle, au moment où l'on vise l'astre, donne, en effet, l'inclinaison du rayon visuel sur l'horizon, c'est-à-dire la *hauteur* de l'astre au moment de l'observation : les tables astronomiques donnent l'heure vraie correspondante.

l'autre côté de *ab*, se dirigera suivant A'B'; la lecture de l'arc NA' donnera donc une valeur trop grande. — Or, si l'on remarque que l'arc AM est égal à MA', ou, en d'autres termes, que chacun d'eux est la moitié de AA', on voit que la déclinaison δ, mesurée par l'arc NM, s'obtient par la formule

$$\delta = \frac{NA + NA'}{2}.$$

Donc si, après le retournement, l'aiguille fait avec le méridien géographique un angle différent de celui qu'elle faisait d'abord, on obtient la déclinaison en prenant la *moyenne* de ces deux angles (*).

736. Boussole d'inclinaison. — La boussole d'inclinaison, dont nous avons indiqué le but (733, 2°), est représentée par la figure 516. — L'aiguille aimantée est mobile autour d'un axe en acier, qui repose sur des couteaux d'agate soutenus par des traverses horizontales *t*, *t'*; le limbe *ll'*, sur lequel se meut l'aiguille, est fixé perpendiculairement à la plaque PP'; le niveau à bulle d'air *n* permet de régler l'horizontalité de cette plaque, au moyen des vis calantes de l'instrument. La plaque peut tourner, avec tout ce qu'elle supporte, autour de l'axe vertical du pied H, en entraînant avecelle le vernier V; celui-ci se meut sur un limbe horizontal CC', qui est fixé au pied de l'instrument, et dont le centre est sur l'axe de rotation. Le déplacement du vernier sur le limbe fait connaître l'angle de rotation.

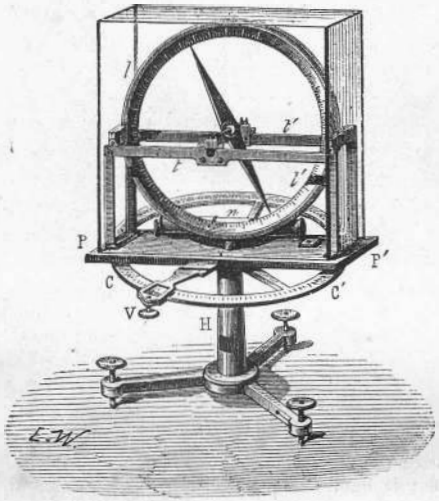


Fig. 516. — Boussole d'inclinaison.

Pour déterminer l'inclinaison d'un lieu, on règle d'abord les vis calantes de façon que la plaque PP' soit bien horizontale, et que, par suite, l'axe de rotation et le limbe *ll'* soient bien verticaux. — On place ensuite le limbe dans le plan du méridien magnétique, ce qui est facile,

(*) La figure 515 suppose que la ligne des pôles *ab* passe par le point de suspension O de l'aiguille. Cette condition n'est pas non plus toujours réalisée, mais il est facile de voir que la même formule convient encore au cas où la ligne des pôles ne passerait pas par le point de suspension. Il suffira, pour le démontrer, de faire la figure dans ce cas particulier.

si l'on connaît le méridien géographique du lieu et l'angle de déclinaison. — La position que prend l'extrémité australe de l'aiguille sur le limbe fait connaître l'inclinaison du lieu (*).

L'inclinaison éprouve, en un même lieu, comme la déclinaison, des variations lentes avec le temps. — A Paris, en janvier 1892, elle était de 65° 9′.

737. Composante horizontale de la force magnétique terrestre, en un point du globe. — En un point déterminé du globe, la force magnétique terrestre T est la force qui solliciterait l'*unité de masse magnétique australe*, supposée placée en ce point (729). Quand il s'agit d'un aimant mobile dans un plan horizontal, la composante horizontale H de cette force T est la seule dont on ait à considérer l'action sur le pôle austral de l'aimant (733, 1°). Si l'on désigne par i la valeur de l'inclinaison, au point considéré, la valeur de cette composante horizontale (rapportée toujours à l'unité de masse magnétique australe) est liée à T par la formule $H = T \cos i$.

Cette quantité H joue un rôle très important dans les mesures électriques; on la détermine directement (**). En un même lieu, elle varie lentement avec le temps. Sa valeur, en unités C.G.S., à Paris, en janvier 1892, était de 0,1958; il faut entendre par là que le pôle austral d'une aiguille de déclinaison, dont la masse serait de m unités C.G.S., serait sollicité par une force exprimée, en dynes, par $m \times 0{,}1958$.

Quand on assimile le champ magnétique terrestre à celui que produiraient deux pôles magnétiques, de masse m, situés de part et d'autre du centre du globe, à une petite distance a, la mesure de l'intensité de la force terrestre à la surface du sol fait connaître le moment magnétique $M = m \times 2a$ de l'aimant terrestre. On trouve, en unités C.G.S, $M = 8{,}5 \times 10^{25}$ (Voir aux *problèmes*). — En faisant le quotient $A = \frac{M}{V}$ de ce moment magnétique par le volume V de la Terre, on obtient l'*intensité d'aimantation* de la Terre; on trouve, en unités C.G.S., $A = 0{,}08$. Cette intensité est très faible, si on la compare à celle des aimants usuels, qui est de plusieurs centaines d'unités.

(*) Nous avons supposé connu le plan du méridien magnétique : si l'on ne connaît pas ce plan, on peut le déterminer avec la boussole elle-même. — Supposons, en effet, que le plan du limbe soit placé *perpendiculairement au méridien magnétique* du lieu : les forces du couple terrestre étant dans le plan du méridien magnétique, chacune d'elles pourra être décomposée en deux autres forces dirigées dans ce plan, l'une horizontalement, l'autre verticalement. Le couple terrestre est ainsi remplacé par deux autres : l'un, ayant ses forces horizontales et perpendiculaires au plan du limbe, ne peut imprimer à l'aiguille aucun mouvement; l'autre, ayant ses forces verticales et situées dans le plan du limbe, amènera l'aiguille dans une position verticale. — Donc, pour orienter le limbe dans le méridien magnétique, on pourra lui donner d'abord, par tâtonnements, une orientation telle que l'aiguille s'arrête *dans une position verticale*; il suffira de faire tourner ensuite le limbe de 90 degrés, pour qu'il arrive à coïncider avec le plan du méridien magnétique.

Pour corriger les erreurs qui peuvent tenir à ce que la ligne des pôles ne coïnciderait pas exactement avec la ligne des pointes, on peut encore avoir recours à la méthode du retournement (735).

(**) Voir aux problèmes le principe de la méthode.

738. Boussoles usuelles. — La connaissance de la valeur de la *déclinaison*, dans chaque région du globe, permet d'employer l'aiguille aimantée pour s'orienter. — Les instruments qui servent à cet usage portent encore le nom de *boussoles*.

On construit de petites boussoles portatives, qui se composent simplement d'un cercle divisé, au centre duquel est une aiguille aimantée, mobile sur un pivot. Une boussole étant placée horizontalement, la pointe bleue de l'aiguille se dirige à peu près vers le nord. — Si l'on veut obtenir la direction nord-sud avec plus d'exactitude, on peut tenir compte de la déclinaison.

La *boussole d'arpentage* présente une disposition semblable. Elle sert à orienter, sur un plan ou sur une carte, les contours des terrains, les sinuosités des routes ou des rivières, etc.

739. Boussole marine. — C'est surtout en mer que la boussole est indispensable, pour maintenir exactement le navire dans la direction qu'il doit suivre.

La *boussole marine* (*fig.* 517) se compose essentiellement d'une aiguille aimantée fixée sur une lame circulaire de talc, qui repose sur un pivot : cette lame porte, marqués sur sa surface, les degrés de la circonférence et la rose des vents. Une *suspension de Cardan* (note de la page 95), permet au pivot de se placer toujours verticalement, malgré les oscillations du navire. — La boussole est installée à l'arrière du navire, sous les yeux du timonier chargé de la manœuvre du gouvernail, de manière à lui permettre de comparer, à chaque instant, la direction de l'aiguille avec celle du navire. Pour faciliter cette comparaison, la boîte de la boussole porte une ligne fixe AB, placée dans la direction de l'axe du navire : c'est ce qu'on appelle la *ligne de foi*. Pourvu que l'on connaisse approximativement la position géographique du point où l'on se trouve, on sait, par cela même, quel angle fait la ligne nord-sud avec la route à suivre ; par suite, en tenant compte de la déclinaison du lieu, on sait quel angle doit faire l'aiguille aimantée avec la direction du navire, c'est-à-dire avec la ligne de foi. Si le navire n'est pas exactement dans la direction de la route à suivre, on en est averti par l'observation de la boussole, et on l'y ramène au moyen du gouvernail.

Fig. 517. — Boussole marine.

III. — PROCÉDÉS D'AIMANTATION. — CONSERVATION DU MAGNÉTISME DANS LES AIMANTS.

740. Procédé de la simple touche. — Pour aimanter une tige d'acier, il ne suffit pas de la mettre en présence d'un aimant (720) ; la force coercitive s'opposant au mouvement des aimants élémentaires qui, dans l'acier à l'état neutre, sont orientés dans tous les sens, ce n'est qu'au bout d'un temps très long que la tige d'acier pourrait acquérir une aimantation sensible. L'expérience montre que les frottements rendent l'aimantation plus rapide et plus énergique.

Prenons une aiguille à tricoter, en acier ; appuyons-la fortement sur l'extrémité australe d'un barreau aimanté, et faisons-la glisser dans le sens de la longueur. Recommençons cinq ou six fois cette opération, en ayant soin que le frottement ait toujours lieu *dans le même sens*, de gauche à droite, par exemple. — En tous les points de l'aiguille qui viennent de dépasser l'extrémité du barreau, on peut considérer la force coercitive comme momentanément diminuée, en raison de l'ébranlement qui est produit par le frottement ; les aimants élémentaires peuvent alors s'orienter, le pôle austral de chacun se dirigeant dans le sens de la force magnétique. — Une fois l'opération terminée, on constate, en effet, qu'il s'est formé un pôle boréal à l'extrémité de l'aiguille qui, dans les frottements successifs, s'est toujours trouvée la dernière en contact avec le barreau ; à l'autre extrémité, il s'est formé un pôle austral. — C'est le *procédé de la simple touche*.

741. Procédé de la touche séparée. — Le procédé de la *touche séparée*, indiqué par Duhamel pour aimanter les aiguilles des boussoles, consiste dans la série suivante d'opérations.

On installe solidement, sur un plan horizontal, deux aimants puissants AM, BM′ (*fig.* 518), se regardant par les pôles contraires, et séparés par une règle de bois L : au-dessus, on place la lame à aimanter *ab*. L'opérateur, prenant dans chaque main un barreau aimanté, appuie ces deux barreaux sur le milieu de la lame, en les inclinant comme l'indique la figure, et en plaçant le pôle austral *a* de l'un des barreaux N du même côté que le pôle A ; le pôle boréal *b* de l'autre barreau N′ du même côté que le pôle B : il les fait alors glisser en sens contraires, chacun vers l'une des extrémités de la lame, comme l'indiquent les flèches. Ce mouvement terminé, on enlève les deux barreaux en même temps, on les reporte au milieu de la lame,

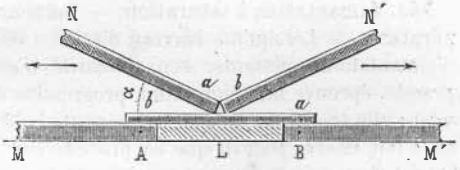


Fig. 518. — Aimantation par touche séparée.

et l'on recommence l'opération un certain nombre de fois, en exerçant les frictions alternativement sur les deux faces.

On voit que les quatre barreaux agissent ici *d'une manière concordante* : avec la disposition indiquée sur la figure, il se produira un pôle austral en *a* et un pôle boréal en *b*.

742. Procédé de la double touche. — Le procédé d'aimantation par *double touche*, imaginé par Mittchell et perfectionné par Æpinus, est surtout applicable aux barreaux de grandes dimensions.

Le barreau à aimanter étant installé sur deux barreaux fixes, comme dans la méthode précédente, on place sur son milieu deux autres barreaux inclinés (*fig.* 519), séparés par une petite cale de bois. On les fait glisser, ensemble et *sans les séparer*, vers l'une des extrémités du barreau à aimanter; puis, de cette extrémité vers l'autre, et ainsi de suite; on termine l'opération par l'extrémité opposée à celle qu'on a parcourue la première, et l'on revient de cette extrémité jusqu'au milieu du barreau.

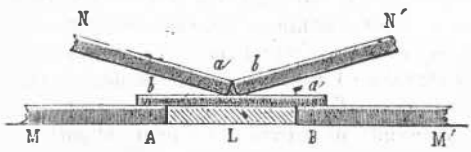


Fig. 519. — Aimantation par double touche.

On voit que, pendant tout le mouvement, les deux pôles contigus des barreaux mobiles exercent des actions contraires sur les aimants élémentaires qui sont *en dehors* de l'intervalle qu'ils comprennent, en sorte que ces actions se neutralisent. Ces deux pôles exercent, au contraire, des actions concordantes sur les aimants élémentaires de la région *au-dessus de laquelle ils passent*; et comme ils passent successivement au-dessus de tous les points du barreau à aimanter, ils y développent une aimantation régulière. Le pôle austral et le pôle boréal se développent respectivement en *a* et *b*, comme l'indique la figure.

743. Aimantation à saturation. — Influence des variations de température. — Lorsqu'un barreau d'acier a été soumis à des procédés d'aimantation puissants, son *intensité d'aimantation*, d'abord très grande, éprouve une diminution progressive dans les instants qui suivent : elle tend vers un état permanent, indépendant du procédé dont on a fait usage, pourvu que ce procédé soit suffisamment énergique. On dit alors que le barreau est aimanté *à saturation*. — En général, un barreau aimanté à saturation conserve une intensité d'aimantation *d'autant plus grande* qu'il a été *trempé plus dur*, c'est-à-dire trempé à une température plus élevée. Dans les barreaux usuels, l'intensité d'aimantation varie de 200 à 400 unités C.G.S.

Les petites variations de température auxquelles le barreau peut ensuite être soumis, pendant les diverses saisons, font éprouver à son intensité d'aimantation des variations sensibles, mais généralement tem-

poraires. Ainsi, pour un même aimant, elle diminue quand la température s'élève; elle augmente quand la température s'abaisse; mais, à une même température, elle reprend toujours sensiblement la même valeur. — Au contraire, si l'on porte un aimant à la température du rouge, l'acier subit un *recuit*, c'est-à-dire que l'effet produit sur lui par la trempe disparaît; après le refroidissement, il ne présente plus aucune trace d'aimantation (*).

744. Aimantation par l'action de la Terre. — Un barreau de fer doux doit s'aimanter, par influence, sous la seule action du champ magnétique terrestre.

L'expérience montre, en effet, que si l'on place une barre de fer dans une direction voisine de celle de l'aiguille d'inclinaison, l'extrémité inférieure manifeste les propriétés d'un pôle austral; l'extrémité supérieure, celles d'un pôle boréal. L'aimantation se reproduit en sens inverse dans la barre, si on la retourne bout pour bout. Enfin l'aimantation disparaît, si l'on place la barre dans la direction perpendiculaire au méridien magnétique.

Cependant une barre de fer ordinaire peut acquérir une faible aimantation permanente, quand, après l'avoir placée parallèlement à l'aiguille d'inclinaison, on la frappe avec un marteau. Des faisceaux de fil de fer, placés de la même manière, acquièrent aussi, quand on vient à les tordre, une aimantation durable. On doit donc considérer ces actions mécaniques comme développant dans le fer une force coercitive.

Enfin, une tige d'acier, placée dans cette même direction et soumise à des frottements ou à des chocs, acquiert une aimantation assez intense et durable. — C'est ainsi qu'on s'explique comment les limes, et la plupart des outils d'acier qui sont, par leurs usages, soumis à des frottements ou à des chocs répétés, donnent toujours des signes d'aimantation sensible. Ils ont acquis cette aimantation *sous l'influence de la Terre*, dans des conditions semblables à celles que nous venons d'indiquer.

745. Conservation des aimants. — Armures et contacts. — Il résulte de ce qui précède qu'il est nécessaire de prendre certaines précautions pour conserver aux aimants leur intensité d'aimantation. — Si, par exemple, un barreau aimanté était abandonné à lui-même, dans une position quelconque, il pourrait arriver que, soit par l'action de la Terre, soit par l'action d'autres aimants voisins, les aimants élémentaires tendissent à s'orienter en sens inverse; l'aimantation du barreau irait alors en s'affaiblissant.

(*) On doit à Pouillet cette remarque, que les corps magnétiques, mais sans force coercitive, comme le fer doux, cessent d'être attirables à l'aimant quand on les chauffe à une certaine température. — La température à laquelle ce phénomène se produit n'est d'ailleurs pas la même pour les diverses substances magnétiques : ainsi le nickel cesse d'être magnétique vers 340°; le fer, à la température du rouge cerise; le cobalt, à une température beaucoup plus élevée.

Pour empêcher ces effets de se produire, on conserve généralement les barreaux aimantés, deux par deux, dans une même boîte, parallèlement entre eux, mais en plaçant les pôles de noms contraires en regard (*fig.* 520). On interpose entre eux des cales de bois, pour s'opposer à leur rapprochement, et l'on applique en travers, sur leurs extrémités, des pièces de fer doux *ba*, *ab*, qu'on appelle des *contacts*. Les deux barreaux agissent simultanément, pour aimanter par influence les deux contacts; les contacts réagissent à leur tour sur les barreaux, pour leur conserver leur intensité d'aimantation.

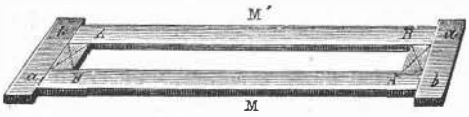


Fig. 520. — Conservation des aimants.

De même, pour les aimants qui ont la forme de fer à cheval (*fig.* 521),

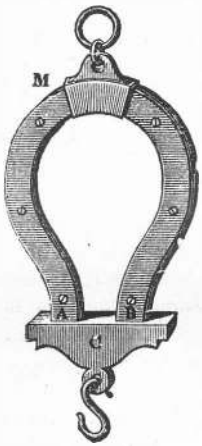


Fig. 521. — Aimant en fer à cheval.

Fig. 522. — Aimant naturel, avec ses armures.

on conserve l'aimantation en appliquant, sur les extrémités des deux branches, un *contact*, c'est-à-dire une pièce de fer doux C, qui s'aimante sous l'influence des deux pôles A et B. — De même encore, pour conserver un aimant naturel E (*fig.* 522), on l'assujettit entre deux pièces de fer, P, P′, qu'on appelle les *armures*, et qui sont maintenues par un anneau transversal de cuivre : les talons A et B qui terminent ces pièces de fer constituent des pôles de noms contraires. C'est sur ces pôles qu'on applique le *contact* C, qui joue le même rôle que dans les cas précédents.

L'expérience a montré d'ailleurs que, pour conserver aux aimants leur intensité d'aimantation, il est avantageux de leur faire porter toujours un certain poids. On peut, par exemple, suspendre au contact C un petit seau V (*fig.* 522), dans lequel on placera des balles de plomb dont on augmentera le nombre de jour en jour, de manière à *nourrir* l'aimant. On arrivera ainsi à faire soutenir à l'aimant une charge bien supérieure à celle qu'il portait d'abord (*).

746. Aimants de Jamin. — L'expérience montre que l'acier, façonné sous la forme de lames d'une assez grande longueur et d'une faible épaisseur, peut acquérir, toutes choses égales d'ailleurs, une intensité d'aimantation plus grande que sous la forme de barreaux. Cette remarque a conduit Jamin à construire des aimants dont la disposition diffère sensiblement de celles qui avaient été adoptées jusqu'alors.

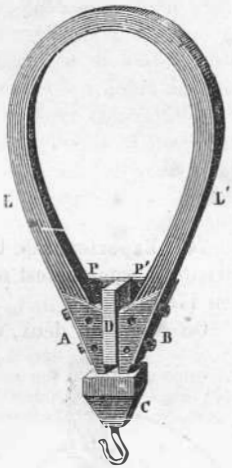


Fig 523.
Aimant de Jamin.

Un certain nombre de lames d'acier trempé sont d'abord *aimantées séparément*, à saturation : on les réunit ensuite, en les plaçant à plat les unes sur les autres, et l'on courbe le système de manière à en former un fer à cheval (*fig.* 523). — La lame la plus extérieure LL' est fixée par ses extrémités, au moyen de vis, dans deux armures de fer doux A, B, maintenues par des brides de cuivre P, P'. Les autres lames, intérieures à la première, et maintenues appliquées contre elle par leur élasticité, ont des longueurs calculées de façon que leurs extrémités s'appuient sur les deux armures. — Les aimants ainsi construits peuvent porter des charges qui atteignent jusqu'à seize fois leur propre poids.

(*) On doit avoir soin cependant de ne pas augmenter trop rapidement les poids ; car, si le contact venait à se détacher sous une charge excessive, l'aimant deviendrait tout à coup moins énergique qu'il ne l'était primitivement : il faudrait recommencer à le nourrir, avec une charge moindre, pour lui rendre peu à peu sa force.

CHAPITRE III

ÉLECTRICITÉ DYNAMIQUE

PILES ÉLECTRIQUES

I. — PHÉNOMÈNES GÉNÉRAUX.

747. Expérience de Galvani. — L'origine de la découverte de l'électricité dynamique est une expérience de Galvani, effectuée à Bologne en 1786.

On coupe en deux, vers la région lombaire, la colonne vertébrale d'une grenouille récemment tuée : après avoir dépouillé la partie inférieure du corps, on distingue, de chaque côté de la colonne vertébrale, deux faisceaux blanchâtres, qui sont la réunion des nerfs lombaires se rendant aux pattes postérieures. On prend alors un arc métallique COZ (*fig.* 524), formé d'un fil de cuivre C et d'un fil de zinc Z, réunis en O, et l'on engage l'un de ces fils sous les nerfs lombaires, comme le montre la figure. Si maintenant on vient à toucher, avec l'extrémité de l'autre fil, les muscles de l'une des cuisses, on voit la cuisse se contracter. Le même phénomène se reproduit à chaque nouveau contact (*).

Fig. 524.
Expérience de Galvani.

Ces contractions rappellent celles qui se produisent quand le corps d'un animal est traversé par une décharge électrique (709). Aussi Galvani vit-il d'abord dans le muscle un véritable *condensateur*, chargé de l'une des électrici-

(*) Cette expérience se présenta à Galvani d'une manière presque fortuite : les membres inférieurs de plusieurs grenouilles avaient été préparés comme nous venons de le dire, et suspendus à un balcon de fer, par un crochet de cuivre qui traversait la

tés à l'intérieur, c'est-à-dire dans les points ou pénètre le nerf, et d'électricité contraire à l'extérieur; l'arc métallique jouait alors le rôle d'un *excitateur* (695), établissant la communication entre ces deux armatures.

748. Théorie et expériences de Volta. — En reproduisant l'expérience de Galvani et en variant les conditions, Volta, professeur à Pavie, constata que, pour obtenir des contractions énergiques, il est nécessaire d'employer un arc formé de *deux métaux différents*. — Il fut alors conduit à une théorie nouvelle, d'après laquelle le *contact de corps différents* a pour effet d'établir entre eux une différence d'état électrique, ou de potentiel, par une *force électrique* spéciale (*).

D'après Volta, les effets observés dans l'expérience de Galvani sont dus, au moins pour la plus grande partie, à ce que le contact du zinc et du cuivre au point O (*fig.* 524) développe une force électrique qui a pour effet de charger le zinc d'électricité positive; le cuivre, d'électricité négative. Au moment où les extrémités de l'arc métallique viennent à être réunies par le corps de la grenouille, c'est la combinaison de ces électricités contraires, au travers des muscles et des nerfs, qui est la cause principale de la contraction. — Dès que la communication est interrompue, la différence entre les potentiels des deux métaux se rétablit, ce qui permet de répéter l'expérience; et ainsi de suite (**).

moelle épinière; le but du savant professeur de Bologne était d'étudier l'influence que peuvent exercer, sur le système nerveux, les décharges qui s'effectuent entre des nuages orageux. Contre son attente, il vit les muscles s'agiter de mouvements convulsifs, en l'absence de tout orage, chaque fois que le vent amenait les muscles au contact des barreaux de fer.

(*) Pour s'expliquer cette *force électrique*, due au contact de deux corps différents, il suffit d'admettre que les molécules matérielles exercent, sur les masses électriques voisines, des actions qui dépendent de la nature des molécules elles-mêmes. — S'il en est ainsi, au moment où l'on met en contact deux corps différents, préalablement à l'état neutre, les quantités d'électricité positive et négative, $+q$ et $-q$, réunies préalablement à la surface de contact, ne peuvent plus demeurer en équilibre. En effet, les molécules du premier corps exercent, sur la masse électrique positive $+q$, des actions dont la résultante est une force F_1, proportionnelle à q, et dirigée perpendiculairement à la surface de séparation; la résultante des actions des molécules du deuxième corps est une force F_2, proportionnelle à q, mais différente de F_1, et dirigée en sens inverse. En définitive, la force $F_1 - F_2$, proportionnelle à q, sollicite cette quantité d'électricité positive à se déplacer vers l'un des corps. Une force égale et de sens contraire sollicite la quantité d'électricité négative $-q$, à se déplacer vers l'autre corps. — Le quotient $\frac{F_1 - F_2}{q}$, c'est-à-dire la force rapportée à l'unité de masse électrique, est ce qu'on appelle la *force électrique* au contact des deux corps.

(**) Pour qu'il y ait développement d'une force électromotrice, il n'est pas nécessaire que les corps mis en contact soient métalliques : il suffit qu'ils soient de *natures différentes*. — C'est ainsi que Volta interpréta une expérience célèbre, que Galvani avait considérée comme une objection irréfutable à la théorie nouvelle. En détachant simplement les nerfs lombaires, et laissant tomber leur extrémité libre sur les muscles de la cuisse, Galvani avait obtenu des contractions; d'après Volta, c'est le contact de ces deux tissus, de natures différentes, qui donnait lieu au développement d'électricité.

Pour appuyer cette *théorie du contact*, Volta fit un grand nombre d'expériences : voici l'une des plus décisives. — Il prit un électroscope dont la tige était surmontée d'un plateau de *cuivre* couvert d'un vernis à sa surface supérieure, et déposa sur ce plateau un plateau de *zinc* couvert d'un vernis à sa surface inférieure : il montra que, en établissant d'abord la communication entre les deux plateaux par un fil de cuivre muni de manches isolants, et en enlevant ensuite le plateau de zinc, on trouvait l'électroscope chargé d'électricité négative, tandis que le zinc était chargé d'électricité positive. On en doit conclure que, avant la séparation, l'équilibre électrique étant établi, le zinc était porté à un potentiel positif, et le cuivre à un potentiel négatif; de sorte que l'excès du potentiel du zinc sur celui du cuivre était une quantité positive $+ v$.

Voici une autre série d'expériences, qu'il est facile de reproduire :

1° Une lame de zinc Z ayant été soudée bout à bout avec une lame de cuivre C, on prend à la main l'extrémité zinc, qui est ainsi maintenue au potentiel zéro (*fig.* 525), et l'on applique l'extrémité cuivre contre le plateau inférieur d'un électroscope condensateur, en touchant avec l'autre main le plateau supérieur. On constate alors, en supprimant les communications et séparant les deux plateaux, que la lame de cuivre a agi sur l'instrument comme une source d'électricité *négative*. Les potentiels du zinc et du cuivre étant respectivement zéro et $-v$, l'excès du potentiel du zinc sur le cuivre est v, quand l'équilibre électrique est établi.

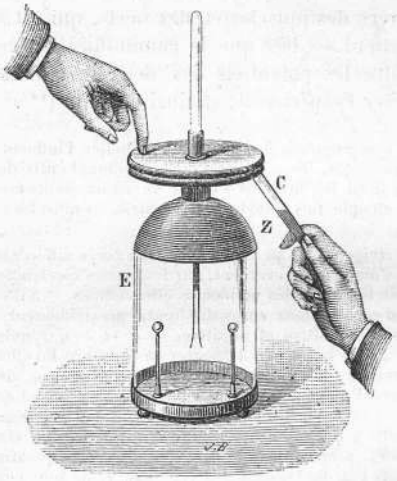


Fig. 525. — Expérience de Volta.

2° Si l'on répète l'expérience, en prenant la lame par l'extrémité cuivre, et appliquant contre le plateau de l'instrument l'extrémité zinc, l'électroscope n'accuse aucune trace d'électricité. — Ce résultat est encore une confirmation de la théorie. En effet, le zinc est alors en contact par ses deux extrémités avec des pièces de cuivre, savoir : d'une part, la lame de cuivre que l'opérateur tient à la main; d'autre part, le plateau de cuivre de l'électroscope. Le premier contact doit établir une différence de potentiel v entre le zinc et la lame de cuivre; le second doit établir la même différence v, en sens inverse, entre le zinc et le plateau de

cuivre. En d'autres termes, le plateau de l'électroscope doit être au même potentiel que la lame de cuivre ; mais la lame de cuivre, en raison de sa communication avec le sol, est à l'état neutre : il doit donc en être de même du plateau de l'instrument.

3° Enfin, la lame étant placée de la même manière, si l'on interpose, entre son extrémité zinc et le plateau de l'électroscope, un fragment de papier imprégné d'eau acidulée avec de l'acide sulfurique, on constate que le plateau se charge d'électricité positive, et la charge est plus grande que dans le premier cas. — Ce résultat n'est pas en contradiction avec le précédent, puisque les corps en contact ne sont plus les mêmes.

Les expériences de Volta, et d'autres expériences plus précises qui ont été faites depuis, ont conduit à la loi suivante, que l'on doit considérer comme rigoureusement démontrée :

Lorsque deux corps différents, mis en contact, sont en équilibre électrique, il existe entre eux une différence de potentiel qui ne dépend que de leur nature et de leur température ; elle est indépendante de l'étendue de la surface de contact, et de la valeur du potentiel sur chacun des corps.

749. Distribution de l'électricité, au contact de deux conducteurs de natures différentes. — Couche double. — Soient deux conducteurs de natures différentes, comme une lame de zinc Z et une lame de cuivre C (*fig.* 526), en contact par la surface *ab*, et en équilibre électrique. D'après la loi qui vient d'être énoncée, si, pour une raison quelconque, la lame C est chargée d'électricité positive ou négative, à un potentiel V positif ou négatif, la lame Z sera toujours au potentiel $V + v$, la quantité v étant toujours positive. — Pour expliquer cette variation de potentiel à la surface de contact *ab*, on est conduit à admettre qu'il existe, de part et d'autre de cette surface, deux surfaces $a'b'$ et $a''b''$, parallèles à *ab* et très voisines, sur lesquelles sont réparties deux couches d'électricité, l'une positive et l'autre négative (*fig.* 526) ; c'est ce que l'on appelle une *couche électrique double*.

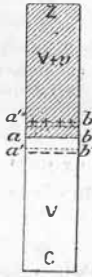


Fig. 526.

L'espace compris entre les surfaces $a'b'$ et $a''b''$ qui limitent la couche double est un champ électrique, dans lequel la valeur de la force électrique est $F = \frac{(V + v) - V}{a'' a'} = \frac{v}{\varepsilon}$, en désignant par ε l'épaisseur de la couche double. Cette force électrique, dirigée du zinc au cuivre, dans le sens du potentiel décroissant (662), est tenue en équilibre par la force électrique de contact, dirigée en sens inverse.

Par rapport aux surfaces $a''b''$ et $a'b'$, qui limitent les deux conducteurs Z et C en équilibre électrique, la force électrique F doit être considérée comme positive pour l'une, et négative pour l'autre (654, *Rem.*). D'après le théorème

de Coulomb (654), les densités électriques sur chacune des surfaces doivent être respectivement :

$$+\mu = \frac{F}{4\pi} = \frac{v}{4\pi\varepsilon} \quad \text{et} \quad -\mu = \frac{-F}{4\pi} = -\frac{v}{4\pi\varepsilon}.$$

750. Circuit entièrement métallique. — Il est aisé de voir que les forces électriques dues au contact entre deux métaux différents, à une même température, ne pourraient jamais produire, dans un circuit *entièrement métallique*, une *circulation continue* d'électricité.

Considérons d'abord le cas le plus simple, celui d'un circuit formé de deux lames, de zinc et de cuivre par exemple, en contact au point M par une de leurs extrémités (*fig.* 527), et portant à leurs autres extrémités des fils de cuivre AB, DE, qui pourront être réunis en BE. Dans ce système, où n'entrent que *deux métaux*, quelle que soit la valeur V du potentiel sur le fil de cuivre AB, le potentiel sur le zinc Z est $V + v$; par suite, le potentiel sur le cuivre CDE est $V + v - v$, ou V; c'est-à-dire que les deux fils de cuivre DE et AB sont *au même potentiel*. Dès lors, si l'on vient à fermer le circuit en BE, il ne peut se produire aucun mouvement d'électricité.

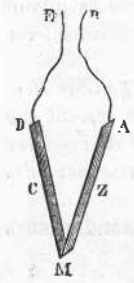


Fig. 527. — Circuit entièrement métallique.

Il en serait encore de même si l'on interposait d'autres métaux en des points quelconques, de manière à constituer une chaîne continue, formée *d'un nombre quelconque de métaux différents, à la même température*. Les expériences de Volta ont montré que, l'équilibre électrique étant établi, la différence de potentiel observée sur les deux métaux qui forment les extrémités d'une pareille chaîne, est toujours *la même que si ces deux métaux étaient mis directement en contact.* Cette dernière loi est ce que Volta appelait la *loi des tensions*, et ce que l'on peut appeler aujourd'hui la *loi des potentiels*. — Il en résulte que, si la chaîne est terminée, de part et d'autre, par deux fils *de même nature*, ces fils sont toujours à un même potentiel; par suite, il ne peut se produire aucun mouvement électrique quand on vient à fermer le circuit. — Nous allons voir que les conditions sont tout autres, dans un circuit comprenant une *pile électrique*.

II. — PILES A UN SEUL LIQUIDE.

751. Principe des piles hydro-électriques. — Différence de potentiel aux deux pôles d'une pile, en circuit ouvert. — Supposons que l'on interpose, entre deux métaux différents, un *liquide* capable d'exercer une action chimique sur l'un d'eux. — Plongeons, par exemple, une lame de zinc Z et une lame de cuivre C dans de l'eau aci-

dulée par l'acide sulfurique (*fig.* 528). L'expérience montre qu'il s'établit une différence de potentiel entre les fils de cuivre P et N qui terminent les lames : il suffit, après avoir relié le fil N au sol, de mettre le fil P en communication avec un électroscope condensateur, pour constater qu'il est électrisé *positivement*; en répétant l'expérience avec le fil N, on constate qu'il est électrisé *négativement*. L'ensemble formé par les deux fils, les deux lames et le liquide interposé, constitue un *couple électrique*; le fil P est le pôle *positif* du couple, le fil N est le pôle *négatif*.

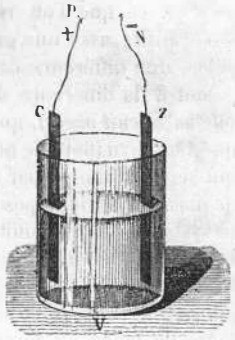


Fig. 528. — Couple formé de deux métaux et d'un liquide interposé.

Or, si l'on relie le pôle négatif au sol, et si l'on met le pôle positif en communication avec un électromètre à quadrants (*fig.* 459), la déviation observée fait connaître l'excès e du potentiel du pôle positif sur celui du pôle négatif. Cette différence de potentiel e est évidemment la somme des variations de potentiel, v, v', v'', qui existent : 1° entre le fil N et la lame de zinc; 2° entre cette lame et l'eau acidulée; 3° entre l'eau acidulée et la lame de cuivre. Elle doit donc être indépendante de l'étendue des surfaces de contact (748), c'est-à-dire des dimensions du couple; elle ne doit dépendre que de la nature des corps qui le composent. — C'est ce que l'expérience vérifie.

Prenons maintenant un certain nombre de couples semblables (*fig.* 529); réunissons, par un fil de cuivre, le zinc du premier couple

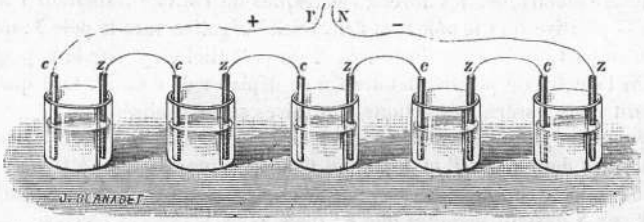


Fig. 529. — Pile à tasses.

au cuivre du second; par un autre fil de cuivre, le zinc du second au cuivre du troisième; et ainsi de suite, en ne laissant libres que le cuivre du premier couple et le zinc du dernier. Enfin, à ces deux lames, adaptons des fils de cuivre P et N. On donne le nom de *pile* à cette réunion de couples. Les fils P et N sont les pôles *positif* et *négatif* de la pile. — Quand les deux pôles sont séparés, la pile est dite *en circuit ouvert*; elle constitue un conducteur en équilibre électrique.

Il est aisé de voir que l'excès du potentiel du fil P sur celui du fil N doit être *proportionnel au nombre des couples* de la pile. En effet, si l'on va de N en P en passant par la pile, chaque fois que l'on rencontre un couple, le potentiel, pris sur chaque fil de cuivre, doit croître de e. — C'est ce que l'on vérifierait encore au moyen de l'électromètre à quadrants : avec une pile de 10 couples, on trouverait, entre les deux pôles, une différence de potentiel égale à $10e$ (*).

Soit E la différence de potentiel entre les deux pôles P et N d'une pile *en circuit ouvert*, quand l'équilibre électrique est établi. D'après ce que l'on a vu (660), le nombre E mesure le *travail*, moteur ou résistant, qui serait accompli par les forces dues aux actions exercées sur l'unité de masse électrique positive, par les masses électriques distribuées dans le système, si cette unité de masse se déplaçait de P en N, ou de N en P, par un chemin quelconque. — Supposons que l'unité de masse positive se déplace du pôle négatif N au pôle positif P, en passant par la pile. Puisque l'équilibre électrique existe dans le système, la résultante de *toutes* les forces électriques (y compris les forces de contact) est nulle en chaque point de ce système; le travail total doit donc être identiquement nul. Mais, d'après ce qui vient d'être dit, E mesure alors le travail *résistant* de celles des forces qui sont dues aux masses électriques distribuées dans le système; dès lors, le *travail moteur des forces électriques de contact*, pour ce déplacement de l'unité de masse électrique positive de N en P, *a aussi pour mesure E*. — Nous allons voir que ce nombre E mesure encore ce qu'on appelle la *force électromotrice* de la pile, quand elle fonctionne en circuit fermé.

752. Courant électrique. — Quand la pile, en circuit ouvert, est en équilibre électrique, les forces électriques de contact sollicitent l'électricité positive vers le pôle P, et l'électricité négative vers le pôle N : mais d'autre part, en raison de l'excès E du potentiel en P sur le potentiel en N, l'électricité positive tendrait à se déplacer de P en N : tant que le circuit reste *ouvert*, ces actions contraires se neutralisent.

Quand on ferme le circuit, c'est-à-dire quand on met en communication les deux pôles P et N par un fil métallique, il passe, à travers ce fil, de l'électricité positive de P en N, en sorte que l'excès de potentiel de P sur N devient *moindre que E* ; mais alors, les forces électriques de contact n'étant plus équilibrées, il se produit, à la fois dans la pile et dans le fil qui réunit ses deux pôles, un *mouvement continu* d'électricité, qui a reçu le nom de *courant électrique*. — On est convenu d'appe-

(*) Si une pile de 10 couples est reliée au sol *par son pôle négatif*, le pôle positif est au potentiel $+ 10e$. — Si elle est reliée au sol *par son pôle positif*, le pôle négatif est au potentiel $- 10e$. — Enfin, si cette même pile est reliée au sol *par son milieu* (entre le 5e et le 6e couple), le pôle positif est au potentiel $+ 5e$, et le pôle négatif est au potentiel $- 5e$. C'est cette disposition qu'on utilise, pour charger à des potentiels égaux et de signes contraires les deux couples de secteurs de l'électromètre à quadrants (678).

ler spécialement *sens du courant*, le sens dans lequel circule l'électricité positive; en d'autres termes, on considère le courant comme allant *du pôle positif au pôle négatif, dans la partie du circuit qui est extérieure à la pile.*

L'étude de l'électricité, considérée comme se mouvant ainsi dans un circuit fermé, a reçu le nom d'électricité *dynamique*. — C'est la faculté de donner naissance à un courant continu, qui caractérise les piles comme sources d'électricité.

753. Force électromotrice d'une pile. — Le passage du courant donne naissance, comme on le verra, à un dégagement de chaleur dans les divers points du circuit; il peut aussi produire des effets de mouvement sur les corps extérieurs. D'une manière générale, le passage du courant dans un circuit se manifeste par une apparition d'*énergie*, sous une forme ou sous une autre, dans le circuit lui-même.

Considérons, en particulier, la quantité d'énergie qui apparaît pendant le temps que met l'unité de masse électrique positive à parcourir le circuit, quand le régime régulier du courant est établi. Cette quantité d'énergie n'est qu'une transformation du travail que cette masse électrique, sollicitée par les forces électriques de contact, a reçu en traversant successivement les surfaces de séparation des conducteurs différents qui constituent la pile. On a vu (751) que ce travail a pour mesure E (différence des potentiels aux pôles de la pile ouverte). — Si, au lieu de l'unité de masse électrique, on considère une quantité d'électricité q, parcourant le circuit, la quantité d'énergie correspondante sera :

$$W = Eq.$$

Si q est exprimé en *coulombs* et E en *volts*, W est exprimé au moyen de l'unité pratique d'énergie correspondante, le *joule* (701, *Rem.*). — Si l'on suppose $q = 1$, il vient $W = E$; c'est-à-dire que le nombre E, qui mesure *en volts* la différence de potentiel aux deux pôles d'une pile en circuit ouvert, mesure aussi, *en joules*, l'énergie correspondante au transport de 1 coulomb dans le circuit fermé, quand le régime régulier du courant est établi. — C'est dans ce sens qu'on dit que la *force électromotrice* de la pile est de E volts.

754. Transformation de l'énergie, dans le phénomène du courant électrique. — En général, quand il ne se produit aucun effet extérieur au circuit, c'est sous forme de chaleur, c'est-à-dire d'énergie *actuelle*, que l'énergie apparaît dans le circuit. Or, pendant le passage du courant, on doit considérer les forces électriques de contact comme des forces *intérieures*, dues aux actions des molécules des corps en présence; ces forces agissant ici comme motrices, il en résulte une diminution de l'énergie potentielle des corps de la pile (51. *Rem.*). D'après le principe de la conservation de l'énergie, l'apparition d'une quantité déterminée d'*énergie actuelle*, dans le circuit, doit correspondre à la

disparition d'une quantité égale d'*énergie potentielle* dans la pile (*). c'est ce qu'on peut vérifier comme il suit.

Si l'on fait agir de l'eau acidulée sur une lame de zinc, au sein d'un calorimètre à mercure (*fig.* 236), on trouve qu'il y a dégagement de 18 grandes calories, pour 33 grammes de zinc consommés : la quantité d'énergie potentielle qui disparaît dans cette réaction chimique est représentée par 18×425 ou 7650 kilogrammètres. — Si maintenant on modifie l'expérience de manière à donner naissance à un courant, en mettant en communication le zinc et le liquide par un *long* fil de cuivre, dont la plus grande partie soit *extérieure* au calorimètre, la quantité d'énergie mise en jeu, pour le même poids de zinc consommé, reste encore la même ; mais l'expérience montre que le dégagement de chaleur dans le calorimètre est beaucoup plus faible, surtout si le circuit extérieur est très développé. La plus grande partie de l'énergie potentielle disparue dans les corps en présence a donc été transformée en *énergie électrique*, laquelle s'est elle-même transformée en énergie calorifique, devenue sensible dans le circuit (**).

755. Pile de Volta. — La *pile de Volta*, qui fut construite en 1794, et qui devint

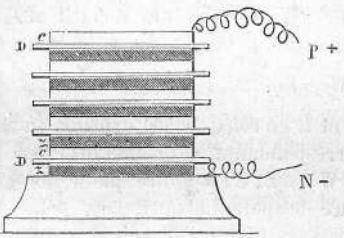


Fig. 530.

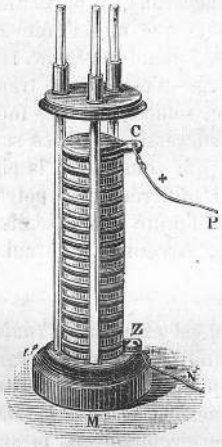


Fig. 531. — Pile à colonne, de Volta

l'origine de toutes les autres piles, présente une disposition un peu différente de la pile à tasses.

(*) Ces considérations générales suffisent pour montrer l'impossibilité de la production d'un courant électrique dans un circuit formé *uniquement de métaux*, comme celui que nous avons indiqué plus haut (*fig.* 327). En effet, les métaux qui composent ce circuit n'éprouvent, au contact l'un de l'autre, aucune modification dans leur constitution. Dès lors, s'il y avait production d'un courant et des effets qui en sont la conséquence, ces résultats ne seraient accompagnés d'aucune dépense d'énergie. Les mêmes phénomènes pourraient se continuer ainsi indéfiniment : on aurait réalisé un *mouvement perpétuel*.

(**) Quand on répète l'expérience en repliant le fil de cuivre, de manière à le placer dans le moufle d'un second calorimètre à mercure, on trouve que, pour 33 grammes de zinc consommés, la *somme* des quantités de chaleur dégagées dans les deux calorimètres est encore exactement de 18 grandes calories.

Pour construire une pile de Volta, on place, sur un socle isolant, un disque de zinc *z* (*fig.* 530), une rondelle de drap D imprégnée d'eau acidulée et un disque de cuivre *c*; on répète un certain nombre de fois la même succession, et l'on termine par un disque de cuivre. Au premier disque de zinc est fixé un fil de cuivre N; au dernier disque de cuivre est fixé un autre fil de cuivre P. — Il est aisé de voir que la disposition des diverses parties de la pile ainsi construite correspond exactement à celle de la figure 529. Le pôle positif est à l'extrémité du fil P adapté au dernier cuivre; le pôle négatif, à l'extrémité du fil N adapté au premier zinc (*).

C'est cette disposition de disques *empilés* les uns sur les autres (*fig.* 531), qui a été l'origine de l'expression de *pile électrique*.

Dans la pile de Volta, en circuit ouvert, la différence de potentiel aux deux pôles est d'environ *un volt par couple*. Il en est de même pour la pile à tasses, et pour toutes les piles que l'on va décrire et qui présentent la même succession : cuivre, zinc, eau acidulée, cuivre. — Mais ces piles se distinguent les unes des autres par la résistance plus ou moins grande qu'elles opposent au passage de l'électricité, lorsque le circuit est fermé. On conçoit que, à force électromotrice égale, et avec un même circuit extérieur, la quantité d'électricité qui traverse la pile, en un temps donné, doit être d'autant plus grande que la surface des lames est plus considérable, et que l'épaisseur de l'eau acidulée qui les sépare est plus petite.

756. Modifications apportées à la pile de Volta. — Dans la pile de Volta, les rondelles de drap laissent échapper l'eau acidulée, sous l'action du poids qu'elles supportent, et la pile s'affaiblit rapidement. — Aussi a-t-on imaginé d'assujettir verticalement les lames métalliques dans une auge de bois (*fig.* 533), où l'on verse le liquide. Les pièces de drap deviennent alors inutiles : il suffit de laisser, entre les doubles lames métalliques, des intervalles dans lesquels le liquide pénètre. Cette disposition est connue sous le nom de *pile à auge*. — C'est avec

(*) Volta construisait la pile autrement : il superposait des rondelles formées de *deux disques zinc et cuivre soudés*; chaque rondelle était placée de façon que le zinc fût à la face supérieure; entre deux rondelles consécutives, était un drap imprégné d'eau acidulée (*fig.* 532). — Il est facile de voir que, à la partie inférieure, le premier cuivre est inutile, et que, à la partie supérieure, le dernier zinc étant entre deux cuivres, la force électromotrice correspondante au dernier couple n'est pas utilisée dans le courant électrique : on perd donc un élément, quand on emploie la disposition de Volta.

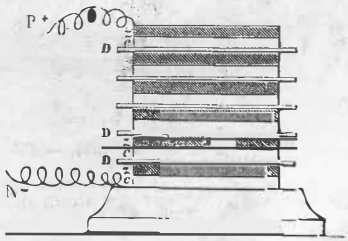


Fig. 532.

une pile semblable, formée de deux cents auges et comprenant en tout deux mille couples, que furent faites, en 1805, à l'Institut royal de Lon-

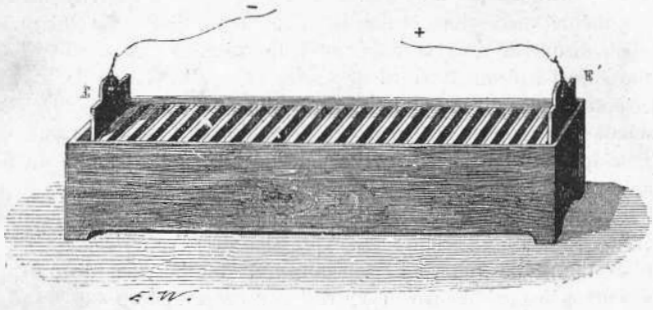


Fig. 533. — Pile à auge.

dres, les célèbres expériences de Davy, qui conduisirent à la découverte des métaux alcalins (771).

Dans la *pile de Wollaston*, les couples successifs, à large surface, sont placés dans des vases séparés, comme dans la pile à tasses; mais, dans chacun des vases (*fig.* 534), la lame de cuivre C est repliée de

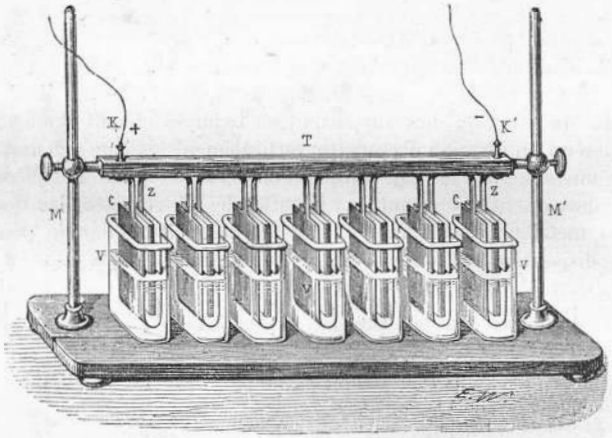


Fig. 534. — Pile de Wollaston.

manière à envelopper des deux côtés la lame de zinc Z, dont elle est séparée par l'eau acidulée. — Tout le système des lames métalliques est ordinairement fixé à une traverse de bois, mobile le long de deux montants M, M'; cette disposition permet d'enlever à la fois toutes ces lames, des vases qui contiennent l'eau acidulée.

La *pile de Münch* (*fig.* 535) se rapproche, par sa construction, de la pile de Wollaston : on a soudé deux à deux, par leurs bords, des lames

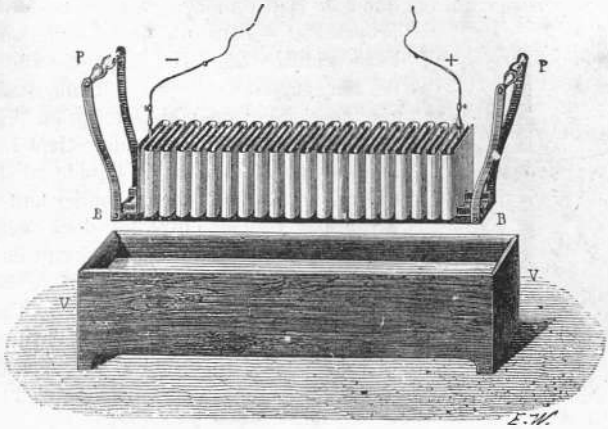


Fig. 535. — Pile de Münch.

de zinc et des lames de cuivre, de manière à en former des doubles lames, telles que *c*M′z (*fig.* 536) : deux séries opposées de ces doubles lames M, M, M, et M′, M′, M′, sont emboîtées l'une dans l'autre, comme l'indique la figure 536. La pile est terminée, d'un côté par un zinc libre Z, qui porte un fil de cuivre, constituant le pôle négatif ; de l'autre par un cuivre libre C, qui constitue le pôle positif. — Toutes les lames sont assujetties (*fig.* 535) sur des traverses de bois B, B, supportées par des poignées P, P. Pour mettre la pile en activité, on plonge les couples dans une auge VV, contenant de l'eau acidulée. — Cette pile a l'avantage d'être peu volumineuse et d'un maniement facile.

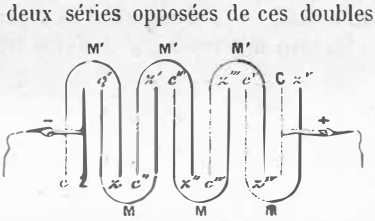


Fig. 536.

757. Emploi du zinc amalgamé, pour la construction des piles. — Pour la construction des piles, le zinc *chimiquement pur* aurait, sur le zinc du commerce, l'avantage de n'être point attaqué par l'eau acidulée, tant que le circuit n'est pas fermé : on éviterait ainsi une usure inutile de ce métal. Mais le zinc pur est d'un prix trop élevé pour qu'on puisse l'employer : on a reconnu que le zinc du commerce, lorsqu'on a *amalgamé* sa surface en le frottant avec du mercure, se comporte, dans une pile, comme le zinc pur lui-même. Il ne se produit pas de dégagement sensible d'hydrogène tant que le circuit n'est pas fermé ;

en outre, quand le circuit est fermé, l'hydrogène se dégage *exclusivement sur le cuivre* de chacun des couples.

Une expérience qui est due à de la Rive met en évidence ces diverses propriétés. — Dans un vase V contenant de l'eau acidulée (fig. 537), on plonge une lame de *zinc parfaitement pur*, ou une lame de *zinc amalgamé*; on n'observe qu'un dégagement d'hydrogène à peine appréciable. — Si l'on plonge alors dans le liquide un fil de cuivre, l'action est encore nulle, tant qu'il n'y a pas contact entre les deux métaux; mais, si l'on vient à fermer le circuit en touchant la lame de zinc Z avec le fil de cuivre, comme le représente la figure 537, l'action chimique devient très intense, et l'hydrogène se dégage en petites bulles, *uniquement sur le cuivre*. Cette particularité trouvera son explication un peu plus loin.

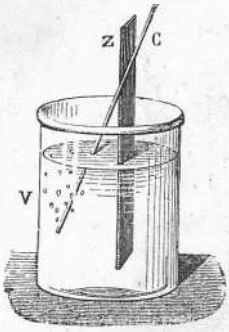


Fig. 537. — Expérience de M. de la Rive.

758. Décomposition de l'eau par un courant. — Peu de temps après l'invention de la pile de Volta, en 1800, Carlysle et Nicholson effectuèrent la décomposition chimique de l'eau par l'action d'un courant électrique. — Voici comment on répète cette expérience.

Un vase de verre V (*fig.* 538) est traversé, à sa partie inférieure, par deux fils de platine, isolés dans une couche de résine; on y verse de l'eau, à laquelle on ajoute un peu d'acide sulfurique pour la rendre plus conductrice, et l'on place, au-dessus des fils A et B, de petites éprouvettes pleines d'eau, C, D. Dès qu'on fait communiquer les pôles d'une pile avec les fils de platine, au moyen des bornes métalliques P et P', on voit se produire, à la surface des fils A et B, et seulement en ces points, une multitude de petites bulles gazeuses qui s'élèvent dans les éprouvettes : du côté du pôle négatif, il se dégage *uniquement de l'hydrogène*; du

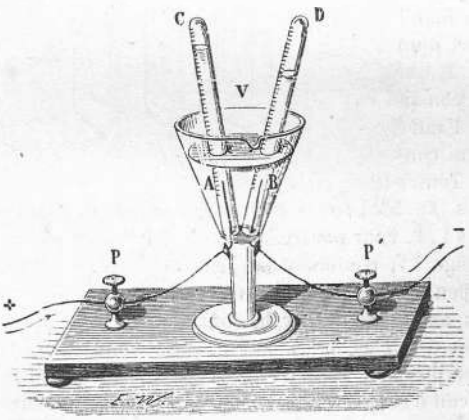


Fig. 538. — Voltamètre.

côté du pôle positif, *uniquement de l'oxygène* ; le volume de l'hydrogène est double de celui de l'oxygène.

Cette expérience est une véritable analyse de l'eau. — Faraday, qui a spécialement étudié ce genre d'analyse, lui a donné le nom d'*électrolyse* (ἤλεκτρον, électricité ; λυειν, décomposer). Il a nommé *électrodes* (ἤλεκτρον, électricité ; ὁδός, passage) les surfaces des deux lames A et B, qui servent au passage du courant à travers l'eau, ou, en général, à travers le corps soumis à la décomposition : l'*électrode positive* est celle qui est reliée au pôle positif de la pile, l'*électrode négative* B correspond au pôle négatif. — Enfin la substance qui éprouve la décomposition a reçu le nom d'*électrolyte*.

Remarquons que, dans cette expérience, le résultat est le même que *si l'hydrogène de l'eau était transporté dans le sens du courant*. L'appareil peut donc servir à déterminer le *sens* d'un courant électrique. — Nous verrons (788) que la quantité de gaz dégagée dans un temps donné est proportionnelle à la quantité d'électricité qui traverse l'appareil pendant le même temps. De là, le nom de *voltamètre*, qui a été donné par Faraday à cet appareil.

759. Théorie de Grotthuss. — Lorsqu'on décompose l'eau par un courant électrique, l'oxygène et l'hydrogène apparaissent, comme nous venons de le voir, *exclusivement à la surface des électrodes* A et B ; dans l'intervalle des lames de platine, on n'aperçoit aucune trace de décomposition de l'eau. — Voici l'explication qui en a été donnée par Grotthuss, en 1806.

Supposons que deux lames de platine P et N (*fig.* 539), plongées dans l'eau acidulée, soient en communication avec les deux pôles d'une pile. Admettons que, dans chaque molécule d'eau à l'état neutre, l'hydrogène soit chargé d'électricité *positive*, et l'oxygène d'une quantité égale d'électricité *négative* : l'hydrogène sera attiré par la lame N, tandis que l'oxygène sera attiré par la lame P ; les molécules d'eau, placées entre les deux lames, s'orienteront donc comme l'indique la figure 539. — Si la force électromotrice de la pile est suffisamment grande, l'action exercée par la lame P, sur la molécule d'eau qui est en contact avec elle, met en liberté l'oxygène de la première molécule. Le départ de l'oxygène rend momentanément libre l'hydrogène de la première molécule ; celui-ci, repoussé par la lame P,

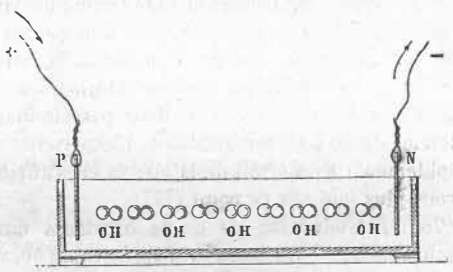


Fig. 539. — Théorie de Grotthus.

vient se combiner avec l'oxygène de la deuxième molécule, qui était déjà attiré par P; et ainsi, de proche en proche (de gauche à droite, dans la figure actuelle), jusqu'à la dernière molécule d'eau, dont l'hydrogène, devenu libre, se dégage sur la lame N. — Les molécules d'eau ainsi reformées s'orientent comme les molécules primitives, et le phénomène se continue tant que dure le courant.

760. Décomposition de l'eau à l'intérieur de la pile. — Prenons maintenant une pile à tasses (*fig.* 529) dont tous les zincs auront été amalgamés. Ainsi qu'il a été dit (757), tant que les fils P et N sont séparés, on n'observe aucun dégagement gazeux à l'intérieur de la pile; mais si l'on réunit ces deux fils, le courant électrique s'établit, et l'on voit des bulles d'hydrogène se dégager à la surface du cuivre de chacun des éléments de la pile. Il se produit donc, dans la pile elle-même, une électrolyse de l'eau, *à l'intérieur de chacun des éléments*.

Si l'on remarque que, dans l'expérience du voltamètre (*fig.* 558), le sens du courant est déterminé par la direction suivant laquelle l'hydrogène est transporté (758), on est amené à cette conclusion que, dans chacun des éléments de pile, le courant électrique va *du zinc au cuivre*. La circulation de l'électricité positive est donc *continue*, aussi bien au travers des éléments de pile successifs que dans le conducteur extérieur. — Dans chacun des éléments, en même temps que l'hydrogène se dégage sur le cuivre, l'oxygène se porte sur le zinc pour former de l'oxyde de zinc, qui, en se combinant avec l'acide sulfurique, se dissout à l'état de sulfate de zinc (*).

761. Causes de variation des piles à un liquide. — Quelques instants après que le circuit a été fermé, les lames de cuivre de la pile à tasses ou de la pile de Wollaston sont couvertes d'hydrogène gazeux, qui fait obstacle au passage du courant. D'autre part, la série des contacts n'est plus la même, puisque l'hydrogène est interposé entre l'eau acidulée et le cuivre; il n'est donc pas étonnant que la force électromotrice de la pile soit modifiée. L'expérience prouve qu'elle diminue rapidement; le courant de la pile va en s'affaiblissant. — Nous reviendrons plus loin sur ce point (777).

762. Introduction de corps oxydants dans la pile. — Pile au bichromate. — On conçoit, d'après ce qu'on vient de voir, qu'il y ait avantage à ajouter, dans le liquide de la pile, un corps oxydant, tel que le

(*) La dissolution du *zinc du commerce* dans l'eau acidulée est aussi un phénomène d'électrolyse. En réalité, le zinc du commerce contenant des parcelles de plomb, chacune de ces parcelles forme, avec le zinc et l'eau, un couple voltaïque, *à circuit fermé*: le courant va du zinc au plomb, à travers l'eau acidulée; l'eau est décomposée, l'oxygène se porte *sur le zinc*, et donne naissance à du sulfate de zinc; les bulles d'hydrogène se dégagent *sur le plomb*. — On remarque, en effet, dans la préparation de l'hydrogène par le procédé employé dans les laboratoires, que les bulles de gaz partent toujours des mêmes points de la surface du métal; ces points sont ceux où se trouvent des parcelles de plomb.

bichromate de potassium, de manière à convertir en eau l'hydrogène que le courant tend à mettre en liberté. Dès que le circuit est fermé, ce sel, en présence de l'acide sulfurique et sous l'influence du courant électrique, est décomposé : il se forme du sulfate de potassium et du sulfate de chrome; une partie de l'oxygène que le sel contenait s'unit à l'hydrogène, et reforme avec lui de l'eau (*).

L'élément de cette *pile au bichromate*, ou *pile de Grenet*, est ordinairement placé dans un flacon fermé par une plaque isolante d'ébonite (*fig.* 540). Dans le liquide plongent, d'une part, une lame de *zinc amalgamé* Z, supportée par une tige métallique B, qu'on relève quand on veut faire sortir le zinc du liquide; d'autre part, deux lames C, C′, faites d'un charbon conducteur de l'électricité (**). Ces deux lames, fixées dans la plaque d'ébonite, sont réunies extérieurement par une pièce métallique AA′, de manière à constituer un conducteur unique.

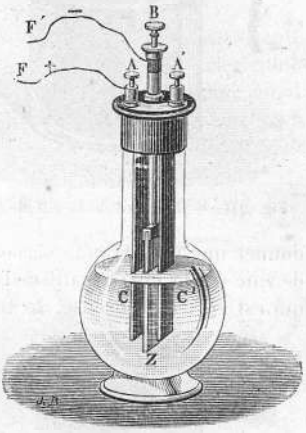


Fig. 540.
Élément de la pile au bichromate, ou pile de Grenet.

La pile au bichromate a une force électromotrice d'environ 2 volts *par couple*, quand elle est récemment montée; elle s'affaiblit à la longue, par le changement de composition du liquide, changement dû au fonctionnement lui-même. — Sous le rapport de la constance, elle est supérieure aux piles précédentes, mais elle est inférieure aux piles *à deux liquides séparés*, que nous allons étudier.

III. — PILES A DEUX LIQUIDES SÉPARÉS.

763. Pile de Daniell. — En 1836, à la suite d'expériences dues à A. Becquerel, le physicien anglais Daniell fut conduit à la construction de l'une des piles les plus constantes que l'on connaisse.

(*) La réaction chimique dont il s'agit ici peut se représenter par la formule suivante

$$KO,2CrO^3 + 4SO^3 + 3H = KO,SO^3 + Cr^2O^3,3SO^3 + 4HO$$

(**) Les diverses variétés de charbon deviennent conductrices, quand elles ont été portées à une haute température. — Pour la construction des piles, on a d'abord fait usage du *charbon de cornue*, qui se dépose sur les parois des cornues où l'on prépare le gaz de l'éclairage par la distillation de la houille. — On emploie aujourd'hui des *charbons agglomérés*, qu'on obtient en comprimant dans des moules une pâte formée de poussières de charbon, mélangées avec du brai (résidu de la distillation des goudrons de houille), et en calcinant fortement cette pâte à l'abri de l'air.

L'élément de la pile de Daniell a reçu diverses dispositions. La plus simple consiste à introduire, au milieu de l'eau acidulée dans laquelle plonge la lame de zinc, un vase poreux contenant, avec la lame de cuivre, *un second liquide*, destiné à empêcher le dégagement d'hydrogène. Ce liquide est une solution concentrée de sulfate de cuivre.

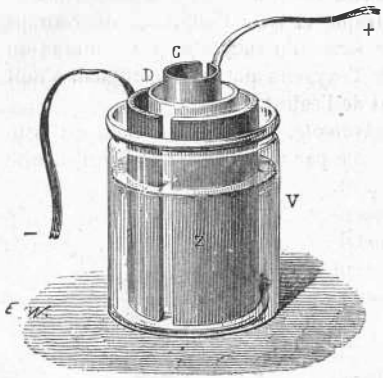


Fig. 541. — Élément de la pile de Daniell.

La figure 541 représente l'élément de pile ainsi disposé. Dans le vase de verre V est placée l'eau acidulée par l'acide sulfurique, et une lame de zinc amalgamé Z, qu'on recourbe sur elle-même pour pouvoir lui donner une plus grande surface; le fil de cuivre attaché à cette lame de zinc est le pôle négatif de l'élément de pile. Dans le vase intérieur D, qui est en terre poreuse, se trouve la solution de sulfate de cuivre, et au milieu une lame de cuivre, qui est ici également recourbée, et qui constitue le pôle positif.

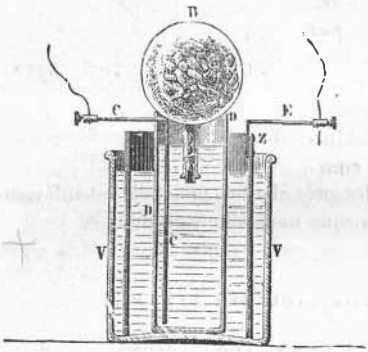


Fig. 542. — Élément de Daniell.

Il est aisé de voir que le dégagement d'hydrogène est complètement supprimé. En effet, la paroi poreuse, tout en empêchant les deux liquides de se mélanger, se laisse cependant imprégner par eux, de manière qu'ils sont en contact l'un avec l'autre dans l'épaisseur même de la paroi. Quand le circuit est fermé, l'eau est électrolysée : l'oxygène se porte sur le zinc pour donner, avec lui et l'acide sulfurique, du sulfate de zinc; l'hydrogène tendrait à se dégager sur la paroi poreuse; mais, d'autre part, nous verrons plus loin (772) que le sulfate de cuivre est également électrolysé : le cuivre se porte sur la lame de cuivre C; l'oxygène et l'acide sulfurique se portent sur la paroi poreuse; cet oxygène se combine, dans la paroi même, avec l'hydrogène provenant de la décomposition de l'eau acidulée. Quant à l'acide sulfurique mis ainsi en liberté, il remplace, dans l'eau acidulée, celui qui s'est combiné avec l'oxyde de zinc. Il n'y a

donc pas de raison pour que la pile s'affaiblisse, tant qu'il reste du sulfate de cuivre non décomposé.

Pour éviter l'affaiblissement graduel de la solution de sulfate de cuivre, on a soin de maintenir toujours des cristaux de ce sel au contact du liquide, pour le saturer. On se borne quelquefois à placer des cristaux dans le vase D; mais il est préférable, quand la pile doit fonctionner longtemps, d'en remplir un ballon de verre B (*fig.* 542), qu'on renverse dans le vase intérieur : à mesure que le liquide se sature, il descend au fond du vase (*).

La force électromotrice de la pile de Daniell est de $1^{volt},08$ *par couple.*

Remarque. — On obtient un élément dont la force électromotrice est exactement de 1 *volt*, en combinant une lame de zinc amalgamé, plongée dans l'acide sulfurique étendu de douze fois son poids d'eau, et une lame de cuivre plongée dans une solution d'*azotate de cuivre.*

764. Pile de Bunsen. — L'élément de la pile de Bunsen (*fig.* 545) diffère de celui de la pile Daniell, par la nature du liquide destiné à prévenir le dégagement d'hydrogène. — Le pôle négatif est toujours un fil de cuivre attaché à une lame de zinc amalgamé Z, plongeant dans l'eau acidulée par l'acide sulfurique; mais le vase poreux D contient de l'*acide azotique* dans lequel plonge un cylindre de charbon aggloméré, auquel est adapté le fil de cuivre qui constitue le pôle positif. — Quand le circuit est fermé, l'hydrogène mis en liberté par la décomposition de l'eau agit sur l'acide azotique, auquel il enlève une partie de son oxygène pour reformer de l'eau. — On évite ainsi les dégagements gazeux.

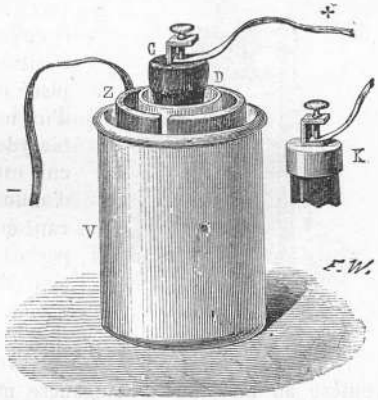


Fig. 545. — Élément de la pile de Bunsen.

L'acide azotique, progressivement réduit par l'hydrogène, est transformé en produits nitreux, en sorte que le liquide du vase D éprouve un

(*) Dans la *pile Callaud*, qui est en usage dans l'Administration des télégraphes et sur les lignes de chemins de fer, *on supprime le vase poreux.* — On se contente de placer des cristaux de sulfate de cuivre au fond d'un vase qui contient de l'eau faiblement acide : la solution saturée de sulfate de cuivre reste toujours sensiblement à la partie inférieure, en raison de sa grande densité. La lame de zinc, dont la hauteur est à peine égale à la moitié de celle du vase, est maintenue à la partie supérieure par un crochet. Le fil de cuivre, protégé par une gaine isolante de gutta-percha dans toute sa partie descendante, se termine par une spirale horizontale de même métal, placée au voisinage des cristaux. — Cette pile a l'avantage d'être économique, et de n'offrir au courant qu'une faible résistance.

changement dans sa composition chimique; d'autre part, on ne prend aucune précaution contre la disparition progressive de l'acide sulfurique libre : aussi, la pile de Bunsen ne peut-elle être considérée comme sensiblement constante que pendant quelques heures.

Pour atténuer cet inconvénient, on verse de temps en temps quelques gouttes d'acide sulfurique dans les vases V; enfin, on remplace l'acide azotique des vases D, quand ce liquide, chargé de produits nitreux, a pris une coloration bleue.

La pile de Bunsen répand des vapeurs acides qui obligent à l'installer en plein air, pourpeu qu'on veuille employer un grand nombre d'éléments.

La force électromotrice de la pile de Bunsen est d'environ $1^{volt},9$ *par couple,* quand elle est récemment montée : c'est presque le double de la force électromotrice de l'élément Daniell.

765. Pile Leclanché. — L'élément de la pile Leclanché (*fig.* 544) se compose, d'une part, d'un bâton de zinc amalgamé Z, plongeant dans un vase de verre V qui contient une solution concentrée de chlorhydrate d'ammoniaque; d'autre part, d'un prisme de charbon C, placé dans un vase poreux T, au milieu d'un mélange de fragments de coke et de bioxyde de manganèse. — Quand le circuit extérieur est fermé, le chlorhydrate d'ammoniaque est décomposé par le courant qui, dans la pile, va du zinc au vase poreux : le chlore se porte sur le zinc, pour donner du chlorure de zinc qui se dissout; l'ammoniaque reste en dissolution dans l'eau. Quant à l'hydrogène qui se porte vers le cylindre de charbon, il enlève au bioxyde de manganèse une partie de son oxygène, pour former de l'eau : le bioxyde de manganèse est simplement transformé en un autre oxyde, moins riche en oxygène.

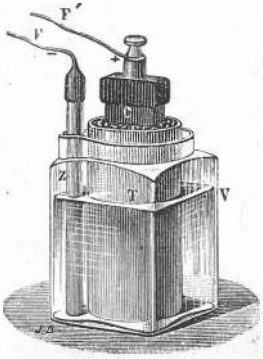


Fig. 544.
Élément de la pile Leclanché.

Cette pile, est surtout avantageuse pour les cas où elle ne doit être mise en action que d'une manière intermittente, avec d'assez longs intervalles de repos : tel, par exemple, le cas des sonneries électriques, pour lesquelles elle est généralement employée. Dans ces conditions, on peut la considérer comme restant sensiblement constante, pourvu qu'on ait soin de remplacer, de temps en temps, l'eau qui s'évapore (*).

La force électromotrice de la pile Leclanché est d'environ $1^{volt},5$ *par couple.*

(*) La *polarisation* que cette pile acquiert dans les moments où elle est mise en action, et qui est une cause d'affaiblissement du courant (777), disparaît d'elle-même pendant les intervalles de repos.

IV. — PILES THERMO-ÉLECTRIQUES.

766. Courants thermo-électriques. — Expérience de Seebeck. — Nous avons vu (750) que, dans un circuit fermé, entièrement formé de métaux soudés à la suite les uns des autres, il ne peut se produire aucun courant, si toutes les parties du circuit sont à la même température. — Il n'en est plus de même si les soudures successives sont *à des températures différentes* : c'est ce que montre l'expérience suivante, qui a été faite par Seebeck en 1821.

Un barreau de bismuth BB′ (*fig.* 545) est soudé, à ses deux extrémités, avec une lame de cuivre CC′ qui forme avec lui un rectangle. A l'intérieur de ce rectangle, on place une aiguille aimantée mobile sur un pivot, et l'on oriente le rectangle dans la direction du méridien magnétique. Si l'on chauffe l'une des soudures B, l'aiguille est déviée : c'est là, comme on le verra plus loin (789), l'une des propriétés des courants électriques, en général. De plus, le sens de la déviation indique que ce courant *thermo-électrique* marche du bismuth au cuivre, au travers de la soudure chauffée.

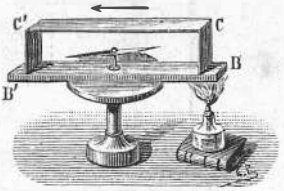


Fig. 545. — Expérience de Seebeck

On peut obtenir un résultat semblable avec deux métaux quelconques ; le sens du courant dépend de la nature des métaux employés (*). — Si l'on forme un circuit fermé avec deux des métaux du tableau suivant, et si l'on chauffe l'une des soudures, le courant marche, *au travers de la soudure chauffée, du métal qui précède au métal qui suit.*

Bismuth.	Argent.	Or.
Nickel.	Étain.	Zinc.
Platine.	Plomb.	Fer.
Palladium.	Rhodium.	Arsenic.
Cobalt.	Laiton.	Antimoine.
Manganèse.	Cuivre.	

Dans un circuit comme celui de la figure 527, en fermant le circuit en BE, et en chauffant la soudure M des lames de zinc et de cuivre, on obtiendra un courant dirigé suivant CMZ. La différence de potentiel v, au contact du zinc et du cuivre, acquiert donc une plus grande valeur quand la température s'élève ; si l'on appelle v_0 la différence des potentiels à la soudure froide A, et v la différence des potentiels à la soudure chaude M, la force électromotrice du courant est $v - v_0$. — L'expérience montre que, pour une différence de température de 100°, entre les deux

(*) On peut même produire un courant thermo-électrique, en chauffant l'un des points d'un circuit formé d'*un seul métal*, pourvu que ce métal présente quelque différence de structure, de part et d'autre du point chauffé.

soudures, la force électromotrice $v - v_0$ est toujours très petite par rapport à v_0, ce qui revient à dire que les différences de potentiel au contact de deux métaux ne croissent que *très lentement* quand la température s'élève.

767. Piles thermo-électriques. — Le plus ordinairement, pour former un *couple thermo-électrique*, on prend un barreau de bismuth ABD (*fig.* 546), courbé en fer à cheval, et soudé, à chacune de ses extrémités A et D, avec des fils de cuivre C et C′ : on plonge l'une des soudures A dans l'eau bouillante, l'autre soudure D étant maintenue dans la glace fondante; le fil de cuivre C, qui correspond à la soudure chaude, est le pôle positif du couple; le fil C′ est le pôle négatif. — La déviation imprimée à une aiguille aimantée par le courant d'un pareil couple reste constante, aussi longtemps que les températures en A et en D sont maintenues invariables. Dans ces conditions, le couple thermo-électrique est donc un véritable *couple à courant constant*; c'est même le seul auquel cette dénomination soit applicable en toute rigueur.

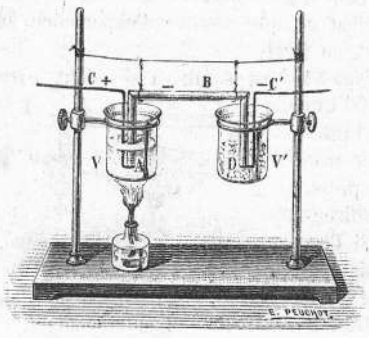


Fig. 546. — Couple thermo-électrique.

En plaçant à la suite les uns des autres un certain nombre de ces couples, on obtient une *pile thermo-électrique*, dont la force électromotrice *totale* est proportionnelle au nombre des couples. — La force électromotrice de chaque couple étant toujours très faible, même avec des différences de température assez

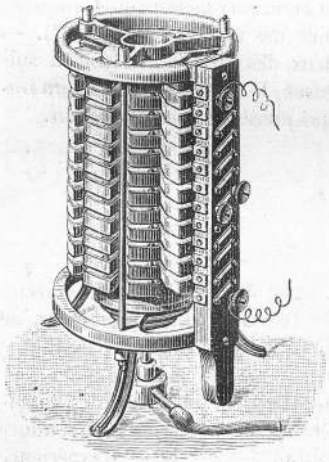


Fig. 547. — Pile de Clamond.

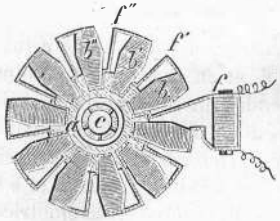


Fig. 548.

considérables entre les soudures, il faut réunir un grand nombre de couples, pour obtenir des effets comparables à ceux des piles hydro-électriques.

La figure 547 représente la *pile de Clamond*. — Chaque couple est formé d'une lame de fer *f* (*fig.* 548), et d'un barreau *b* fait d'un alliage de zinc et d'antimoine. On réunit en couronne dix de ces couples *fb*, *f'b'*, *f''b''*... et l'on superpose ces couronnes, en les séparant par des rondelles d'amiante *a*. Les soudures de rang impair, placées à l'intérieur des couronnes, sont portées à une température d'environ 360°, par la combustion du gaz d'éclairage qui arrive à l'intérieur d'un cylindre *c* percé de trous. Les soudures de rang pair sont en contact avec l'atmosphère : leur température est d'environ 80°. — La force électromotrice d'une pile de 120 couples est d'environ 8 volts.

768. Pile de Melloni. — Thermo-multiplicateur. — C'est d'après les mêmes principes qu'est construite la pile de Melloni, dont nous avons fait usage dans l'étude de la chaleur rayonnante (603).

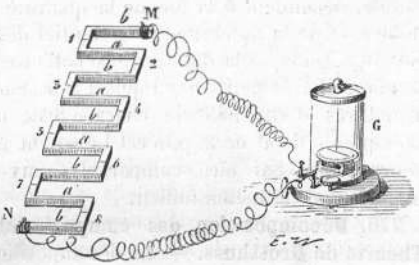


Fig. 549.

La pile est formée de petits barreaux de bismuth *b*, *b*... (*fig.* 549), alternant avec des barreaux d'antimoine *a*, *a*...; ces barreaux, en forme de Z, sont soudés les uns aux autres, de manière à former une chaîne dont les extrémités sont mises en communication avec un galvanomètre G. — Pour faciliter l'usage de la pile, on replie la chaîne des petits barreaux de manière à en former un faisceau prismatique, en ayant soin d'empêcher le contact des barreaux, partout ailleurs qu'aux soudures, par l'interposition de petites bandes de papier verni. Toutes les soudures impaires sont ainsi placées d'un même côté du faisceau; toutes les soudures paires sont de l'autre : ces deux systèmes de soudures forment ce qu'on appelle les *faces* de la pile. Enfin, la pile est assujettie dans une gaine métallique, de manière que ses deux faces dépassent l'étui de part et d'autre, en C et D (*fig.* 550); les deux extrémités de la chaîne sont mises en communication avec les boutons métalliques P, P', qui reçoivent les fils allant au galvanomètre.

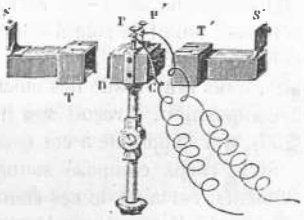


Fig. 550. — Pile de Melloni.

L'appareil ainsi constitué sert, comme on l'a vu (603), à mesurer les

quantités de chaleur qui tombent sur l'une des faces de la pile, par les déviations qu'imprime, à l'aiguille du galvanomètre, le courant dû à la différence de température des deux systèmes de soudures. Cet appareil, d'une grande sensibilité, a reçu le nom de *thermo-multiplicateur*.

V. — EFFETS CHIMIQUES DES COURANTS.

769. Effets généraux des courants. — Une pile est une *source électrique* (679) qui répare instantanément ses pertes d'électricité; un courant électrique peut donc être assimilé à la succession ininterrompue des décharges électriques d'une batterie qui se rechargerait instantanément. Or nous savons que les intensités des effets chimiques, calorifiques, etc., que produit la décharge d'une batterie, à travers un même milieu, dépendent à la fois de la quantité d'électricité qui traverse le milieu, et de la différence de potentiel des deux armatures de la batterie (702). Quoique la différence de potentiel des deux pôles d'un élément de pile soit très petite par rapport à la différence de potentiel des deux armatures d'une batterie chargée avec une machine de Holtz, par exemple, le débit de la pile est tellement grand, que certains effets du courant peuvent être comparables aux effets des décharges d'une batterie dans le même milieu.

770. Décomposition des composés chimiques, en général. — Théorie de Grotthuss. — La décomposition de l'eau, que nous avons déjà étudiée (758), peut être considérée comme le type des décompositions chimiques produites par les courants. Si le corps composé soumis à l'électrolyse est un composé *binaire*, l'un des éléments simples qui le constituent se dégage sur l'électrode positive : c'est celui qui dans le composé jouait le rôle d'élément *électro-négatif*. L'autre se dégage sur l'électrode négative : c'est l'élément *électro-positif*. — Quant au fait que, dans l'intervalle des électrodes, on ne constate aucune trace de décomposition, il reçoit son interprétation par la théorie de Grotthus (759), qui s'applique à ces composés comme à l'eau.

Si le corps composé soumis à l'électrolyse contient plus de deux éléments, certains de ces éléments se dégagent à l'électrode négative : l'ensemble de ces éléments constitue ce que nous appellerons le *groupe électro-positif*; les autres éléments se dégagent à l'électrode positive : c'est ce que nous appellerons le *groupe électro-négatif*. — Dans la molécule du corps composé, ces deux *groupes* se comportent respectivement comme les deux éléments simples d'un composé binaire. La théorie de Grotthus explique encore comment le passage du courant les fait apparaître *exclusivement sur les deux électrodes*, en raison des décompositions et recompositions successives qui se produisent, de proche en proche, dans l'espace intermédiaire.

771. Décomposition des composés binaires. — C'est en 1807 que Davy, en faisant agir sur les alcalis le courant produit par une pile à auges de 2000 couples, isola pour la première fois les métaux alcalins (potassium, sodium).

Pour décomposer la potasse, on emploie aujourd'hui le procédé suivant, qui est dû à Seebeck. — Une cavité, creusée dans un morceau de potasse M (*fig.* 551), contient un globule de mercure N, qui communique avec le pôle négatif de la pile ; le morceau de potasse, un peu humecté d'eau, repose sur une lame de platine AB, qui communique avec le pôle positif. Il se forme un amalgame de potassium en N, et il se dégage de l'oxygène au contact du platine (*).

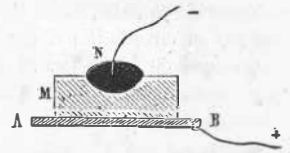


Fig. 551. — Décomposition de la potasse par la pile.

Quand on fait successivement l'électrolyse de plusieurs composés binaires dans lesquels entre un même élément, uni à divers corps simples, on constate que, suivant le corps avec lequel il était combiné, cet élément se dégage à l'une ou à l'autre des électrodes. En d'autres termes, un même élément peut se comporter comme *électro-positif* lorsqu'il est préalablement combiné avec tel corps, comme *électro-négatif* lorsqu'il est combiné avec tel autre. — On ne peut donc pas appliquer à un corps, d'une manière absolue, l'une ou l'autre dénomination : l'expérience apprend seulement lequel des deux corps combinés est électro-négatif *par rapport à l'autre*.

L'expérience montre que l'*oxygène* est électro-négatif *par rapport à tous les autres corps simples* ; tous les métalloïdes sont électro-négatifs *par rapport à l'hydrogène et aux métaux*.

772. Décomposition des sels oxygénés. — Lorsqu'on soumet à l'action d'un courant un sel oxygéné, en dissolution dans l'eau, il se décompose généralement de la manière suivante : le *métal* qui entrait dans la constitution de la base du sel se dépose à la surface de l'électrode négative, tandis que l'*oxygène de la base et l'acide tout entier* sont mis en liberté à l'électrode positive.

Ainsi, lorsqu'on plonge deux lames de platine dans une solution de sulfate de cuivre, et qu'on fait passer un courant entre ces deux électrodes, on voit le *cuivre* se déposer sur l'électrode négative. Sur l'électrode positive, on observe un dégagement d'*oxygène*, et l'on peut constater la présence de l'*acide* dans le liquide environnant.

Pour certains sels, comme les sels de potassium ou de sodium, les

(*) En général, la décomposition par un courant électrique ne peut s'effectuer que si le composé sur lequel on opère est à l'état liquide. Pour la plupart des corps composés, on a pu réaliser cette condition, soit en les dissolvant dans un liquide convenablement choisi, soit en les fondant par la chaleur.

résultats fournis par l'expérience semblent un peu différents : nous reviendrons sur ce sujet (775).

773. Lois de Faraday. — Équivalents électriques des divers corps. — Les expériences de Faraday ont montré que, si un ou plusieurs voltamètres à eau sont intercalés dans le circuit d'une pile, la quantité d'eau décomposée en un certain temps, *dans chacun de ces voltamètres*, est toujours égale à la quantité d'eau décomposée *dans chacun des éléments de la pile* (*). — On en conclut que l'action chimique accomplie par la circulation d'une même quantité d'électricité, en un point quelconque de la partie du circuit qui est extérieure à la pile, est toujours *équivalente* à celle qui s'est produite dans l'un quelconque des éléments de la pile elle-même.

Supposons maintenant que, dans la partie du circuit qui est extérieure à la pile, on intercale, à la suite les uns des autres, un voltamètre à eau, puis un vase contenant une solution d'un sel de cuivre, un autre vase contenant une solution d'un sel d'argent, etc. Le courant, en traversant ces divers composés, leur fait subir une décomposition : si l'on considère, dans chacun d'eux, le corps qui apparait à l'électrode négative, ce corps est, dans le voltamètre à eau, de l'hydrogène; dans le vase contenant un sel de cuivre, du cuivre; dans le vase contenant un sel d'argent, de l'argent, etc. Si l'on détermine les quantités de ces corps qui ont été mis en liberté dans un même temps, on trouve, pour 1 gramme d'hydrogène, 32 grammes de cuivre, 108 grammes d'argent, etc. — Ces poids, qui ont été électrolysés par une même quantité d'électricité, 1 d'hydrogène, 32 de cuivre, 108 d'argent, doivent donc être considérés comme les *équivalents électriques* de ces corps. Or, ces nombres sont aussi ceux que fournit l'étude des phénomènes chimiques, comme représentant les *équivalents chimiques* de ces mêmes corps, c'est-à-dire les poids qui peuvent se remplacer mutuellement dans les combinaisons. — On peut donc dire d'une manière générale, que, *dans tous les points d'un circuit*, aussi bien dans les éléments de la pile que dans les divers électrolytes qui sont soumis à son action, il s'effectue des actions chimiques *équivalentes* (**).

774. Nombre d'éléments de pile nécessaire pour une électrolyse déterminée. — Considérons un circuit comprenant n éléments de pile, identiques entre eux, et divers électrolytes (eau, sel de cuivre, sel d'argent), contenus dans des voltamètres placés à la suite les uns des autres. Il est aisé de voir que, pour que les décompositions électrolytiques se produisent, il faut que

(*) On peut le vérifier en évaluant, d'une part, la quantité d'eau décomposée dans le voltamètre, au moyen des volumes de gaz dégagés; d'autre part, la quantité d'eau décomposée dans chaque élément de la pile, au moyen du poids de zinc qui s'est dissous, et dont on déduit la quantité d'oxygène qui s'est combinée avec ce zinc.

(**) La quantité d'électricité qui doit passer dans le circuit, pour mettre en liberté 1^{gr} d'hydrogène, ou 32^{gr} de cuivre, ou 108^{gr} d'argent, etc., est de $9{,}6 \times 10^5$ coulombs, c'est-à-dire environ 1 million de coulombs.

le nombre n des éléments de la pile atteigne au moins une certaine valeur, déterminée par les conditions de l'expérience.

En effet, les réactions chimiques produites dans la pile étant *exothermiques* (dégageant de la chaleur), ces réactions ont pour résultat une *diminution* de l'énergie potentielle des corps en présence. Soit q le nombre de calories dégagées dans chaque élément de pile par les réactions qui s'y produisent, pour 1 équivalent de zinc consommé : la perte W d'énergie potentielle, éprouvée par les n éléments, pour 1 équivalent de zinc (33^{gr}) consommé dans chacun d'eux, sera représentée par $nq \times E$, en désignant par E l'équivalent mécanique de la calorie. — Les décompositions des électrolytes étant, au contraire, des réactions *endothermiques* (absorbant de la chaleur), elles ont pour résultat un *accroissement* de l'énergie potentielle, dans les voltamètres. Soient q_1, q_2, q_3, les nombres de calories absorbées, dans chacun des voltamètres, par la mise en liberté de 1 équivalent d'hydrogène, ou de cuivre, ou d'argent : le gain w d'énergie potentielle éprouvé par l'ensemble des voltamètres, en même temps que s'accomplissent les réactions précédentes dans la pile, sera représenté par $(q_1 + q_2 + q_3)$ E.

Mais, en même temps que ces réactions se produisent, il y a encore élévation de température dans les diverses parties du circuit (parties métalliques, liquides de la pile, liquides des voltamètres), c'est-à-dire un *accroissement* w' d'énergie actuelle, qui peut varier avec la constitution du circuit, mais qui n'est jamais nul. — Or, d'après le principe de la conservation de l'énergie, on aura toujours $W = w + w'$; donc, pour que les réactions se produisent, il faut qu'on ait toujours $W > w$, c'est-à-dire

$$nq > q_1 + q_2 + q_3 \quad \text{ou} \quad n > \frac{q_1 + q_2 + q_3}{q};$$

On pourra donc ainsi calculer, dans chaque cas, une *limite inférieure* du nombre entier n d'éléments de pile qui sera nécessaire.

Effectuons ce calcul, par exemple, pour le cas particulièrement simple où le circuit ne comprend qu'*un seul voltamètre à eau*, et supposons que la pile soit formée d'éléments de Daniell. — La quantité de chaleur q_1, absorbée dans le voltamètre par la mise en liberté de 1 équivalent d'hydrogène est de 34 500 calories : c'est la chaleur de combinaison de l'eau à l'état liquide. — Quant à la quantité de chaleur q dégagée dans un élément de Daniell pour un équivalent de zinc consommé, on remarquera que les réactions produites dans cet élément consistent dans la substitution d'un équivalent de zinc à un équivalent de cuivre, suivant la formule $Zn + CuO,SO^3 = ZnO,SO^3 + Cu$. La quantité q est donc la différence entre les chaleurs de combinaison du sulfate de zinc et du sulfate de cuivre, l'un et l'autre en dissolution : cette différence est de 23 200 calories. — Donc, pour que les réactions se produisent, il faut qu'on ait $n > \frac{34\,500}{23\,200}$; la limite inférieure de n, en nombres entiers, est 2; c'est-à-dire que, pour décomposer l'eau dans un voltamètre, il faut *au moins deux éléments de Daniell*.

Il n'en serait pas de même avec des éléments de Bunsen. La quantité de chaleur q, correspondante à la réaction complexe qui se produit dans cette pile, est d'environ 42 000 calories; donc, en opérant toujours sur un seul voltamètre à eau, on aura $n > \frac{34\,500}{42\,000}$; c'est-à-dire qu'il suffira d'*un élément de Bunsen* pour produire cette électrolyse.

775. Effets secondaires. — Résultats de la décomposition des sels formés par les métaux alcalins. — Il arrive, dans certains cas, que les éléments mis en liberté par un courant réagissent ensuite sur les corps en présence desquels ils se trouvent : de là, des *actions secondaires*, dont les résultats sont parfois les seuls observables.

Dans un tube en forme d'U (*fig.* 552), versons une solution de sulfate de sodium, colorée avec de la teinture de violettes, et faisons passer un courant dans cette solution, en y plongeant deux électrodes de platine. L'expérience montre que, du côté de l'électrode positive A, il se produit un dégagement d'oxygène, et la teinture de violettes est rougie par l'acide sulfurique mis en liberté; du côté de l'électrode négative B, il se produit un dégagement d'hydrogène, et la teinture de violettes est verdie par la soude. — Ces résultats doivent être attribués : 1° à une *action directe* du courant sur le sel, action qui a mis en liberté, d'un côté, le sodium; de l'autre, l'oxygène et l'acide; 2° à une *action secondaire* du sodium sur l'eau, action qui a produit de la soude et de l'hydrogène.

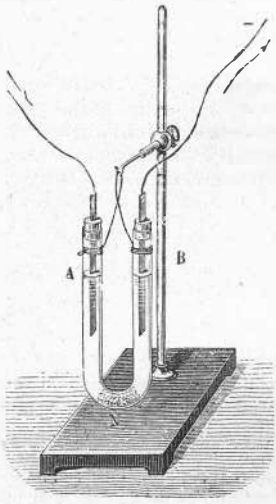


Fig. 552. — Décomposition du sulfate de sodium.

Si les choses se passent en effet de cette façon, il doit suffire, pour obtenir le sodium lui-même à l'électrode négative, de placer du mercure à cette électrode, afin d'absorber le sodium, comme dans l'expérience de Seebeck (771). — C'est ce que vérifie l'expérience : si l'on place la solution saline dans un vase V (*fig.* 553), et qu'on prenne, pour électrode négative, du mercure contenu dans un tube recourbé BD, le sodium s'amalgame à la surface B du mercure, et l'action secondaire est presque supprimée.

776. Emploi d'une électrode positive soluble. — Le résultat final de la décomposition électrolytique d'un sel est encore modifié, quand on emploie, comme électrode *positive*, un métal pouvant se combiner avec les corps qui se portent à cette électrode.

Ainsi, pour décomposer une solution de sulfate de cuivre, prenons comme électrode positive une lame de *cuivre*, l'autre électrode étant formée par un corps conducteur quelconque. La décomposition s'effectuant comme il a été indiqué (772), il se dépose du cuivre sur l'électrode négative; mais l'oxygène et l'acide sulfurique, qui se portent à l'électrode positive, *attaquent le cuivre* qui forme cette électrode, et reproduisent un poids de sulfate de cuivre égal à celui qui a été décom-

pose par le courant. Le liquide reste donc au même état de concentration, et l'effet définitif est le même que si le cuivre, pris à l'électrode positive, était simplement transporté par le courant sur l'électrode néga-

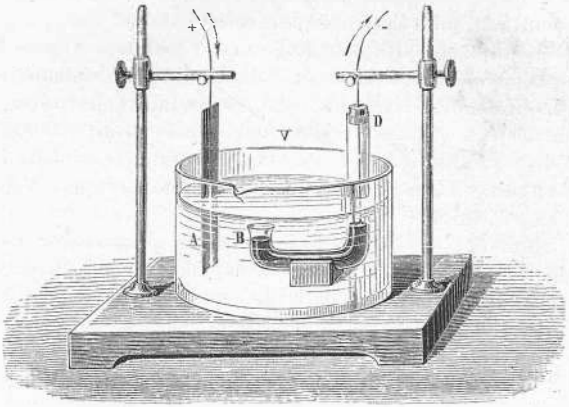


Fig. 553.

tive. — Dans tous les cas de ce genre, on dit, par abréviation, que le métal employé comme électrode positive s'est comporté comme une *électrode soluble*.

Ces remarques trouveront leur application dans la galvanoplastie, la dorure et l'argenture.

777. Phénomènes de polarisation. — Dans tous les cas où l'on décompose un électrolyte par un courant, si les électrodes sont formées de corps *inattaquables* par les produits de la décomposition, on observe, au bout de peu d'instants, un *affaiblissement du courant*. — C'est ce dont il est facile de se rendre compte.

Si l'on électrolyse, par exemple, une solution de sulfate de zinc, en se servant d'électrodes en platine, le zinc se dépose sur l'électrode négative ; dès lors, une fois l'électrolyse commencée, le voltamètre à sulfate de zinc se comporte comme un élément de pile, dont le fil de platine recouvert de zinc est le pôle négatif, et qui, par suite, donne naissance à un courant *de sens contraire* à celui qui produit l'électrolyse elle-même. On comprend donc que le courant *primaire* de la pile soit affaibli par le courant *secondaire* qui ne tarde pas à s'établir. — Lorsque les électrodes sont amenées à cet état particulier où elles peuvent produire un courant secondaire, on dit qu'elles sont *polarisées*.

La polarisation des électrodes s'observe encore quand les produits de la décomposition sont des gaz. — Pour s'en convaincre, il suffit d'intercaler, pendant quelques instants, un voltamètre à eau acidulée dans

le circuit d'une pile : l'hydrogène et l'oxygène électrolysés se condensent en partie sur les électrodes négative et positive. Si l'on supprime la pile, et que l'on mette en communication avec un électromètre de Thomson le fil qui a servi d'électrode positive, en reliant l'électrode négative au sol, on constate que l'électrode positive est à un potentiel positif; donc la série des contacts (platine-hydrogène, eau acidulée, oxygène-platine), n'obéit pas à la *loi des tensions* de Volta (750). — Un voltamètre à eau, dès qu'il a été employé quelques instants à produire l'électrolyse, devient donc un véritable élément de pile, dont le pôle positif est le fil qui a servi d'électrode positive, c'est-à-dire que le courant secondaire marche, dans le circuit, en sens inverse du courant primaire qui a donné naissance à la polarisation.

Nous avons vu (761) que les phénomènes de polarisation se manifestent dans toutes les piles à un seul liquide, par un affaiblissement très notable du courant. La polarisation est considérablement atténuée dans la pile au bichromate de potassium; elle est nulle dans la pile de Daniell.

778. Pile secondaire de Planté. — Accumulateurs. — Les phénomènes de polarisation ont été utilisés pour la construction de piles, dites *piles secondaires* ou *accumulateurs*, qui sont destinées à faciliter l'emploi de l'électricité dans des locaux où il serait difficile d'installer des piles ordinaires.

Chaque élément de la pile secondaire de Planté se compose de deux lames de plomb, de grande surface, enroulées en spirale, et séparées par une toile; le tout plonge dans l'eau acidulée (fig. 554). Pour charger cet élément, on y fait passer un courant : l'eau est électrolysée; à l'électrode positive A, l'oxygène forme, avec le plomb, du bioxyde de plomb ; à l'électrode négative B, l'hydrogène se condense à la surface du plomb. Quand l'hydrogène n'est plus absorbé par le plomb et commence à se dégager à l'état gazeux, on supprime le courant primaire. — L'appareil, ainsi chargé, peut être conservé pendant un temps plus ou moins long, sans perdre sa charge. Quand on vient à réunir les deux lames A et B par un conducteur, il se produit un courant secondaire, qui, dans l'élément de pile, est de sens contraire à celui du courant qui avait servi à le charger. L'eau étant décomposée, son hydrogène se porte sur la lame A et réduit l'oxyde de plomb; l'oxygène qui se porte sur la lame B se combine progressivement avec l'hydrogène qui y avait été condensé pen-

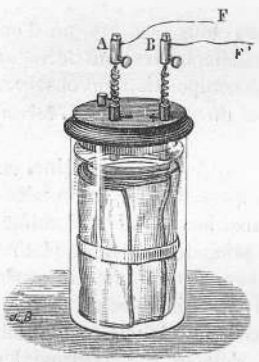


Fig. 554.
Élément de pile secondaire.

dant la charge. Ce courant secondaire persiste tant que les provisions de gaz ne sont pas épuisées (*).

Les différents types d'accumulateurs sont construits d'après le même principe. — Les lames de plomb, généralement planes, sont placées dans une auge qui contient l'eau acidulée (*fig.* 555) : les lames de rang impair communiquent ensemble, et constituent l'une des électrodes A ; les lames de rang pair, mises également en communication, constituent l'autre électrode B.

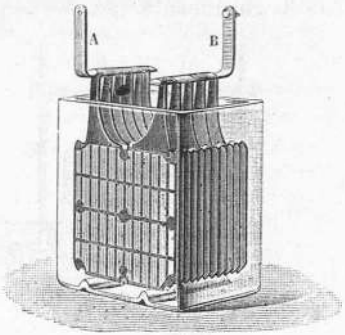


Fig. 555. — Accumulateur.

La charge s'effectue généralement dans des établissements industriels, où sont installés des appareils générateurs d'électricité, et où l'on opère à la fois sur un grand nombre d'accumulateurs. On réunit, d'une part, toutes les électrodes A ; d'autre part, toutes les électrodes B, et l'on fait passer le courant de charge. Avec cette disposition, quelque grand que soit le nombre des accumulateurs, la résistance opposée au passage du courant primaire est très faible.

Une fois les accumulateurs chargés, et transportés dans le lieu où ils doivent être utilisés, si on les réunit entre eux comme nous avons réuni jusqu'ici les éléments de piles, c'est-à-dire si l'on fait communiquer l'électrode B du premier avec l'électrode A du second, et ainsi de suite, la force électromotrice de la pile secondaire ainsi formée est proportionnelle au nombre des accumulateurs.

La force électromotrice de ces piles va en diminuant progressivement pendant la durée du courant secondaire ; sa valeur moyenne est d'environ 2 volts *par couple.*

VI. — GALVANOPLASTIE.

779. Galvanoplastie. — On donne le nom de *galvanoplastie* à l'art de modeler les métaux, en les précipitant de leurs solutions salines par l'action d'un courant électrique. — Les principes de la galvanoplastie ont été posés, en 1838, par Jacobi en Russie, et à peu près en même temps par Spencer en Angleterre.

(*) Pour que le courant secondaire ait une longue durée, il est nécessaire qu'une grande quantité d'hydrogène puisse être condensée à la surface du plomb pendant la charge ; pour cela, il faut que les lames de plomb soient très poreuses. — Pour obtenir ce résultat, on fait passer plusieurs fois le courant primaire dans chaque élément

Supposons qu'il s'agisse de reproduire, par voie galvanique, l'une des faces d'une médaille. — On commence par en prendre l'empreinte avec de la gutta-percha; cette empreinte est *inverse*, c'est-à-dire qu'elle donne en creux les reliefs de la médaille, et réciproquement. — Après avoir recouvert l'empreinte d'une légère couche de plombagine, pour la rendre conductrice, on la plonge dans une solution saturée de sulfate de cuivre, en N (*fig.* 556), à l'extrémité d'un fil communiquant avec le pôle négatif d'une pile. L'électrode positive est formée par une lame de cuivre P : c'est une *électrode soluble*, qui doit abandonner progressivement au liquide une quantité de cuivre égale à celle qui se déposera sur l'autre électrode (776). — On arrête l'opération lorsque la couche de cuivre a atteint une épaisseur suffisante, et on la détache de l'empreinte.

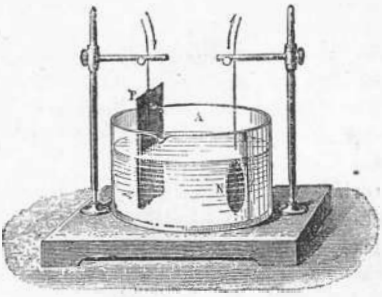


Fig. 556. — Galvanoplastie.

La figure 557 représente un appareil qui peut servir à reproduire galvaniquement plusieurs objets à la fois. La cuve AA contient une solution de sulfate de cuivre,

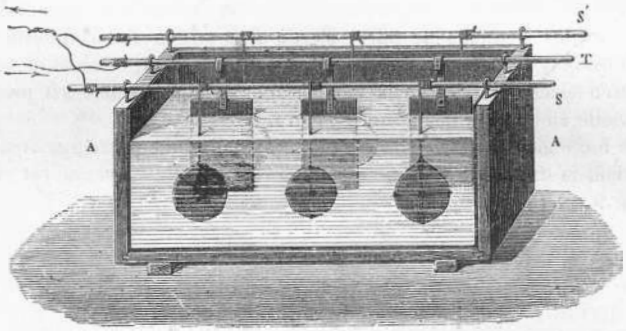


Fig. 557. — Cuve pour la galvanoplastie. (Appareil composé.)

qu'on additionne d'une très petite quantité d'acide sulfurique ou azotique pour la rendre plus conductrice; on suspend à la tringle métallique T qui communique avec le pôle positif, une ou plusieurs lames de cuivre.

alternativement dans un sens et dans l'autre. A chaque opération, l'hydrogène décompose, sur l'une des électrodes, l'oxyde de plomb qui avait été produit par l'opération précédente; les surfaces des deux lames ayant ainsi acquis une grande porosité, l'élément est dit *formé*. — On abrège la durée de la formation, en immergeant préalablement les deux lames de plomb, pendant vingt-quatre heures, dans l'acide azotique.

Parallèlement à ces lames, on suspend aux tringles S et S′, qui communiquent avec le pôle négatif, les empreintes à recouvrir; on a soin de les placer de manière que les surfaces sur lesquelles doit se former le dépôt soient tournées du côté des lames de cuivre.

Cette disposition, qui exige l'emploi d'une pile extérieure à la cuve, a reçu le nom d'*appareil composé* (*).

780. Appareil simple. — On emploie quelquefois une autre disposition, dans laquelle on n'a point à faire intervenir de pile extérieure, et qui est connue sous le nom d'*appareil simple*.

Au milieu de la solution de sulfate de cuivre (*fig.* 558), on place un ou plusieurs vases poreux, contenant chacun de l'eau acidulée par l'acide sulfurique et une lame de zinc amalgamé. Toutes les lames de zinc communiquent avec une tringle isolée T; d'autres tringles isolées

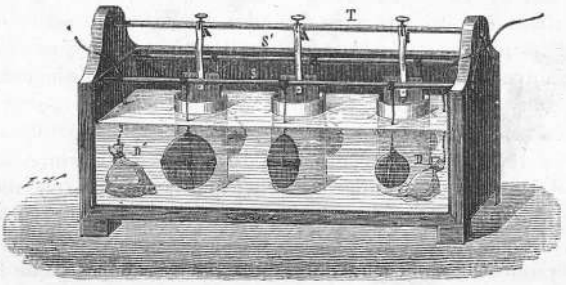


Fig. 558. — Appareil simple.

S, S′, servent à suspendre les empreintes à recouvrir. — Cet ensemble représente évidemment une pile formée de plusieurs éléments de Daniell, dont les lames de zinc sont à l'intérieur des vases poreux, et dont les lames de cuivre sont remplacées par les empreintes conductrices : dès que l'on fait communiquer la tringle T avec les tringles S, S′, le sulfate de cuivre est décomposé, et un dépôt de cuivre se produit sur chacune des empreintes (**).

781. Applications industrielles de la galvanoplastie. — On fait une application journalière de la galvanoplastie, pour le tirage des gravures, et particulièrement de celles qui doivent être insérées dans les ouvrages tirés à plusieurs milliers d'exemplaires. En effet, une

(*) On emploie fréquemment la pile de Daniell, quelquefois la pile de Bunsen. — Le nombre des éléments employés ne doit pas dépasser beaucoup celui qui est strictement nécessaire pour l'électrolyse (774). Si l'intensité du courant était trop considérable, on obtiendrait un dépôt de cuivre pulvérulent.

(**) A mesure que l'opération se poursuit, le bain tend à s'appauvrir en sulfate de cuivre, et à devenir de plus en plus acide. — Dans la figure ci-dessus, D et D′ sont deux petits sacs de toile, contenant des cristaux de sulfate de cuivre qui maintiennent la solution toujours saturée.

planche de bois ou de cuivre s'use rapidement, lorsqu'on la fait servir à un tirage répété. Au lieu d'employer la planche elle-même, on emploie des reproductions galvaniques, ou *clichés*, que l'on peut renouveler chaque fois qu'il est nécessaire. — Pour le tirage des *timbres-poste*, on fait de même un certain nombre de clichés galvaniques, sur le modèle unique qui a été livré par le graveur, et l'on compose une planche avec un certain nombre de ces clichés : on obtient ainsi, au tirage, des feuilles sur lesquelles tous les timbres sont rigoureusement semblables.

Les perfectionnements apportés à la galvanoplastie ont permis d'obtenir des objets présentant des dimensions énormes, des panneaux de portes, des statues, des bas-reliefs, comme ceux qui ont servi à la décoration de l'Opéra de Paris, etc.

782. Dorure et argenture galvaniques. — C'est à de la Rive qu'appartient la première idée d'employer l'électricité pour dorer ou argenter les métaux (*). — Aux sels qu'il avait employés, on en a substitué d'autres, qui donnent au dépôt galvanique plus d'adhérence avec le métal sous-jacent.

Supposons que la cuve A de la figure 556 contienne une solution formée de 100 parties d'eau distillée, 10 parties de cyanure de potassium, et 1 partie de cyanure d'argent; que la lame P soit une lame d'argent, et que N soit une médaille de cuivre, qu'on se propose d'argenter. Si, dans le *bain d'argent*, on fait passer un courant dans le sens PN, le cyanure d'argent sera décomposé, et il se déposera de l'argent sur la médaille; en même temps, l'électrode positive, se comportant comme une *électrode soluble*, restituera à la liqueur l'argent qu'elle aura perdu — La figure 557 donne une idée des appareils qui servent à argenter un grand nombre de pièces à la fois (**).

L'opération de la dorure se fait d'une manière semblable, avec cette seule différence que le *bain d'or*, formé de 100 parties d'eau distillée, 10 parties de cyanure de potassium, et 1 partie de cyanure d'or, doit être porté à une température d'environ 70°.

783. Cuivrage, nickelage, etc. — En modifiant les procédés que nous venons d'indiquer, l'industrie est parvenue à obtenir, au moyen des courants, la plupart des métaux en couches adhérentes à la surface

(*) Cette méthode présente, pour la dorure en particulier, l'avantage de ne point exposer les ouvriers aux vapeurs qui se dégagent dans les procédés de *dorure au mercure*, vapeurs dont l'absorption donne lieu aux accidents les plus funestes.

(**) Les objets qui sont destinés à être argentés ou dorés, dans l'industrie, sont le plus souvent en laiton ou en maillechort. Pour que le dépôt adhère fortement à leur surface, il faut que cette surface ait été préalablement débarrassée de toute matière étrangère : c'est à quoi l'on arrive en plongeant les objets dans des bains successifs d'eau acidulée, d'abord par de l'acide sulfurique, puis par de l'acide nitrique. C'est ce qu'on appelle, dans l'industrie, le *dérochage* et le *décapage*. — Dans les exploitations importantes, le courant est produit par une machine magnéto-électrique, telle que la machine de Gramme, qui sera étudiée plus loin.

des objets, de manière à satisfaire à tous les besoins de l'ornementation ou des usages journaliers.

C'est ainsi que, pour préserver, de l'action oxydante de l'air, les candélabres ou les statues de fonte qui ornent nos places publiques, on les revêt d'une couche de cuivre. — Pour garantir de l'action corrosive de l'eau de mer les plaques de blindage des navires cuirassés, on revêt également ces plaques d'une couche de cuivre, qui n'éprouve qu'une altération superficielle.

C'est ainsi encore que, pour préserver de la rouille les objets de fer ou d'acier, on les couvre d'une couche de nickel, obtenue par l'électrolyse d'un sulfate double de protoxyde de nickel et d'ammoniaque. Le nickel est à peu près inoxydable, et, comme c'est un métal très dur, il suffit d'une couche mince pour résister longtemps à l'usure que tendent à déterminer les frottements.

VII. — EFFETS CALORIFIQUES, LUMINEUX ET PHYSIOLOGIQUES

784. Effets calorifiques. — Il suffit de réunir les deux pôles d'une pile de quelques éléments de Bunsen, par un fil de platine suffisamment fin, pour voir ce fil devenir incandescent. En introduisant dans le circuit des longueurs moindres du même fil, ou en prenant des fils de plus en plus fins, on arrive même à la température de fusion du platine. — Ces effets calorifiques sont surtout très intenses quand on opère avec une pile dont les éléments sont à *grande surface*, comme la pile de Wollaston ou la pile de Münch (*fig.* 534, 535). Avec un seul couple de Wollaston, on amène facilement à l'incandescence un fil de platine fin, fixé entre ses pôles (*fig.* 559).

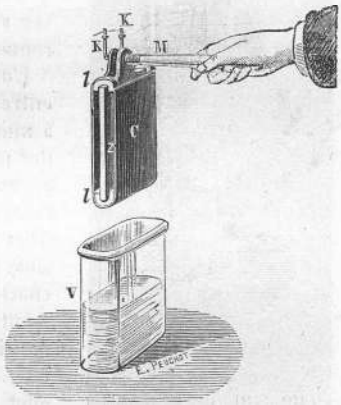


Fig. 559.

785. Effets lumineux. — Arc voltaïque. — Lorsqu'on rapproche les extrémités des fils qui terminent les pôles d'une pile, on n'observe généralement pas d'étincelle; la différence de potentiel des deux pôles est trop faible, pour que les électricités contraires puissent se combiner au travers de l'air (*).

(*) Avec une pile à auges de 1500 à 2000 éléments, Davy a cependant obtenu, en approchant les extrémités des fils à une distance d'une fraction de millimètre, une série continue de petites étincelles.

Mais si, après avoir réuni les deux fils, on vient à les séparer, on observe toujours une *étincelle de rupture*. — Un peu avant la séparation, et lorsque les extrémités des deux fils ne sont plus en contact que par une petite surface, elles sont portées à l'incandescence; une fois les fils séparés, tant que leur distance est très petite, le courant continue à passer à travers le conducteur médiocre constitué par l'air chaud : enfin, des parcelles métalliques, arrachées par le courant, sont amenées à l'incandescence et transportées d'un pôle à l'autre.

Si l'on maintient les extrémités des conducteurs à une petite distance l'une de l'autre, et si l'on opère, par exemple, avec une pile d'une cinquantaine d'éléments de Bunsen, on obtient un phénomène continu.

Fig. 560.

— C'est ce qu'a constaté pour la première fois Davy, en employant deux pointes de charbon (*fig.* 560). Si les deux conducteurs sont disposés horizontalement, la flamme, constituée par l'air chaud et les parcelles de charbon incandescentes, tend à s'élever au milieu de l'air froid qui l'environne, et prend la forme d'un arc.

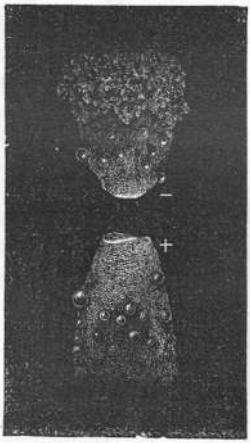


Fig. 561.

L'*arc voltaïque* peut continuer à jaillir entre deux pointes de charbon amenées à une distance de plusieurs centimètres; des particules de charbon sont arrachées à chaque pointe : les unes brûlent dans l'air, les autres sont transportées dans les deux sens. Ce transport est surtout sensible du pôle positif au pôle négatif : le charbon positif s'use en effet plus rapidement que le charbon négatif, et la pointe positive se creuse progressivement (*fig.* 561). L'usure des charbons aurait pour effet d'amener l'extinction de l'arc, si, par un procédé quelconque, on ne rapprochait pas constamment les deux pointes.

La température de l'arc voltaïque est une des plus élevées que l'on puisse réaliser artificiellement : les substances les plus réfractaires, le platine, le quartz, la chaux, y entrent en fusion (*). — Le charbon néga-

(*) On doit à Despretz des expériences sur les effets auxquels on peut atteindre, en oignant, à la chaleur de l'arc voltaïque, la chaleur du soleil concentrée par des lentilles puissantes, et celle d'un chalumeau à gaz hydrogène. Despretz est ainsi parvenu, en opérant dans le vide, à réduire en vapeurs les diverses variétés de charbon, et le

tif atteint une température de 2500°; le charbon positif, une température de 3200°.

Quant à l'éclat de la lumière, il est dû à la vive incandescence des pointes de charbon, et surtout de la pointe positive, plutôt qu'au pouvoir éclairant de l'arc lui-même.

786. Effets physiologiques. —Au moment où l'on met les deux pôles d'une pile en communication avec les organes d'un animal vivant, ou avec les organes d'un animal mort depuis peu, de manière à faire passer le courant dans un nerf moteur, il se produit, dans le muscle correspondant, une contraction d'autant plus forte que l'intensité du courant qui s'établit est plus considérable. — La contraction se renouvelle au moment où l'on interrompt le circuit (*).

Quand on fait passer le courant dans un nerf de sensibilité générale, le nerf transmet au cerveau une sensation douloureuse, à l'instant où le courant commence et à l'instant où il finit; mais, tant que le courant conserve une intensité constante, la sensation est nulle.

Pour obtenir une succession rapide d'effets physiologiques de ce genre, on fait usage d'appareils qui présentent des dispositifs particuliers, de manière à interrompre et à rétablir fréquemment le courant dans l'organe sur lequel on opère. — Plus souvent encore, on emploie une succession de courants dirigés alternativement dans un sens et dans l'autre, comme les courants d'induction, dont l'étude sera faite plus loin. Quand l'un de ces courants passe dans un organe, le point d'entrée et le point de sortie sont portés, au même instant, à des potentiels différents; chaque fois que le courant change de sens, cette différence de potentiel change de signe. Il se produit alors, dans l'organe traversé par les courants alternatifs, des sortes d'oscillations électriques, dont le nombre par seconde est égal à la *fréquence* de ces courants.

L'intensité des effets physiologiques dépend à la fois de la différence de potentiel et de la fréquence des courants. — Quand le nombre des courants qui se succèdent en une seconde n'est pas très considérable, les effets sont d'autant plus accentués que la différence de potentiel est plus grande; pour une différence de potentiel de 1000 volts, l'effet des courants peut entraîner la mort. — Mais quand la fréquence devient très considérable, les effets physiologiques diminuent d'intensité. Par exemple, quand la fréquence dépasse 30 000, les courants alternatifs n'excitent plus les nerfs moteurs, ni les nerfs de la sensibilité; et cela, même avec de très grandes différences de potentiel.

diamant lui-même. Les baguettes de charbon peuvent être courbées ou soudées entre elles; le diamant se transforme en une sorte de graphite, laissant sur le papier une trace noirâtre.

(*) De ces deux contractions, que l'on observe, la première au moment de la *fermeture* du circuit, la seconde au moment de la *rupture*, l'une ou l'autre peut manquer de se produire, quand on opère avec des courants faibles; avec un courant suffisamment intense, elles se produisent toujours toutes deux.

CHAPITRE IV

LOIS DES COURANTS

I. — INTENSITÉS DES COURANTS. — LOIS D'OHM ET DE JOULE.

787. Intensités des courants. — Unité pratique d'intensité : ampère. — Nous considérerons l'*intensité* d'un courant comme définie par *la quantité d'électricité qui passe, en une seconde, par une section quelconque du circuit.* — Si, en t secondes, il passe une quantité d'électricité q, l'intensité est exprimée par le nombre $i = \frac{q}{t}$.

Quand on fait usage des unités pratiques C.G.S., q est évalué en coulombs; l'*unité pratique d'intensité* de courant est alors déterminée par la relation précédente, dans laquelle on fera $t=1$ et $q=1$. C'est l'intensité d'un courant tel que, en une seconde, il passe une quantité d'électricité égale à un coulomb, par une section transversale quelconque du circuit. — Cette unité a reçu le nom d'*ampère*.

Pour un courant dont l'intensité serait i ampères, la quantité d'électricité positive débitée en t secondes serait $q=it$ coulombs.

On donne le nom général de *rhéomètres*, aux appareils qui servent à la mesure des intensités des courants. (Quand l'appareil est disposé de manière à donner l'intensité en ampères, on l'appelle plus particulièrement *ampèremètre*.) — On peut grouper les rhéomètres en trois catégories : les *voltamètres*, fondés sur les effets chimiques des courants; les *galvanomètres*, fondés sur les actions exercées par les courants sur les aimants; et les *électrodynamomètres*, fondés sur les actions exercées par les courants sur les courants.

788. Mesure des intensités des courants par le voltamètre. — L'expérience suivante, due à Faraday, montre que la *quantité d'eau* décomposée dans un voltamètre, en un temps déterminé, est proportionnelle à la quantité d'électricité qui le traverse pendant ce temps. — Le courant d'une pile P (*fig.* 562) passe par un circuit qui se subdivise entre les points C et D; dans chacune des branches de la bifurcation, on intercale un voltamètre, v, v'; des voltamètres sont également placés en V et V', sur les parties non divisées du circuit. — L'expérience montre que les quantités d'hydrogène dégagées en V et V' sont *égales entre elles* : c'est ce que nous savions déjà (773). Les quantités d'hydro-

gène dégagées soit en v, soit en v', sont moindres, mais *leur somme est toujours égale à la quantité dégagée en V* : dans le cas particulier où les deux branches de la bifurcation CvD et Cv'D sont identiques, les quantités d'hydrogène dégagées en v et v' sont égales chacune à la moitié de la quantité dégagée en V. Or, dans ce dernier cas, par chacune des branches passe évidemment la moitié de la quantité d'électricité qui passe en AC ou en DB : la quantité d'eau décomposée est donc proportionnelle à la quantité d'électricité transmise.

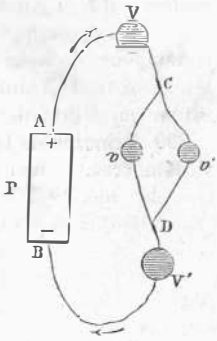


Fig. 562.

On pourra donc, d'une manière générale, obtenir le *rapport* des *intensités* de deux courants, en déterminant le rapport des volumes d'hydrogène qu'ils dégagent, en un même temps. D'autre part, il résulte des déterminations expérimentales, qu'un courant d'un ampère dégage environ 117 millimètres cubes d'hydrogène par seconde, le volume étant mesuré à 0° et sous la pression normale ; on pourra donc évaluer l'intensité d'un courant *en ampères*, par la mesure du volume d'hydrogène qu'il dégage, en un temps connu.

Mais l'emploi du voltamètre présente deux inconvénients. — D'une part, si l'intensité d'un courant vient à varier pendant l'intervalle de temps où l'on recueille les produits de l'électrolyse, le voltamètre ne donne que la valeur *moyenne* des intensités qui se sont succédé pendant cet intervalle. — D'autre part, le voltamètre ne peut pas être employé quand la force électromotrice est insuffisante pour décomposer l'eau ; ainsi, le courant produit par un seul élément Daniell ne décomposera jamais l'eau d'un voltamètre (774).

Pour mesurer les intensités des courants, il est préférable d'employer des *galvanomètres*, fondés sur l'action que les courants exercent sur les aimants.

789. Expérience d'Œrsted. — Règle d'Ampère. — L'action du courant sur l'aiguille aimantée fut observée pour la première fois, en 1819, par Œrsted. — En plaçant un fil métallique dans une direction parallèle à une aiguille aimantée *ab* mobile sur un pivot (*fig.* 565), Œrsted vit l'aiguille s'écarter de sa position d'équilibre, quand on faisait passer un courant dans le fil. Le sens de la déviation de l'aiguille dépendait, et de la direction du courant dans le fil, et de la position du fil par rapport à l'aiguille. — La règle suivante, énoncée par Ampère,

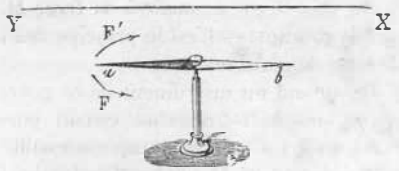


Fig. 565. — Expérience d'Œrsted.

permet de prévoir, dans tous les cas, le sens de la déviation produite :

Un courant rectiligne, agissant sur un aimant, tend toujours à le placer dans une position perpendiculaire à la sienne, et de manière que le pôle austral soit à la gauche du courant. — Pour définir *la gauche du courant*, on suppose que l'observateur se place dans la direction même du conducteur, de façon que le courant entre par ses pieds et sorte par sa tête, son visage étant tourné vers l'aiguille; c'est la gauche de l'observateur qui définit alors la gauche du courant.

790. Principe de la mesure des intensités des courants par les galvanomètres. — Soit un conducteur rectiligne SN, placé dans la direction du méridien magnétique, au-dessus d'une aiguille aimantée (*fig.* 564). Quand le conducteur est parcouru par un courant, l'aiguille prend une certaine position d'équilibre AB, sous l'action de quatre forces égales et parallèles deux à deux, savoir : deux forces horizontales AT, BT′, dues à l'action de la Terre; deux forces AC et BC′, dues à l'action du courant : ces dernières forces ne sont pas rigoureusement horizontales, mais on peut les supposer telles, si la distance du conducteur à l'aiguille AB est suffisamment grande par rapport à la longueur AB. La position d'équilibre de l'aiguille est la direction commune des deux résultantes AR et BR′. — Soit α l'angle de déviation de l'aiguille, que l'on pourra mesurer au moyen d'un cercle divisé, placé au-dessous de l'aiguille; on doit avoir, en remarquant que l'angle TAR est égal à α,

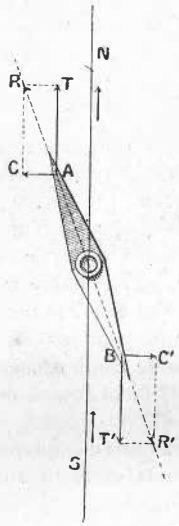


Fig. 564.

$$\text{tang } \alpha = \frac{TR}{AT} = \frac{AC}{AT}.$$

La force AT étant constante, la tangente trigonométrique de la déviation observée est proportionnelle à la force AC qui est due à l'action exercée par le courant. — C'est le principe des instruments qu'on désigne sous le nom de *galvanomètres*.

Or, quand un instrument de ce genre est intercalé, en même temps qu'un voltamètre, dans un circuit parcouru par un courant, on constate qu'il y a toujours proportionnalité entre la *tangente de la déviation observée*, et le *volume d'hydrogène électrolysé* en une seconde. On peut donc obtenir le rapport des intensités de deux courants, traversant successivement un même galvanomètre, par le rapport des tangentes des deux déviations observées.

Les galvanomètres ont l'avantage de donner *à chaque instant* la mesure de l'intensité, alors même que l'intensité varierait d'un instant

à un autre. — Enfin, on peut construire des galvanomètres qui donnent des indications sous l'influence de courants très faibles, dont l'action chimique serait inappréciable.

Tout galvanomètre peut servir d'*ampèremètre*, à la condition qu'on ait préalablement déterminé la valeur de tang α qui, pour ce galvanomètre, correspond à un courant d'un ampère.

791. Résistance d'un conducteur. — Si le circuit d'une pile P contient un galvanomètre G (*fig.* 565), et si l'on vient à allonger le circuit en intercalant entre deux points C et D un fil métallique F, on constate que le galvanomètre accuse une *diminution d'intensité* du courant. On doit donc considérer l'introduction d'un conducteur, dans un circuit, comme apportant à la circulation de l'électricité une résistance, qui a pour effet de diminuer l'intensité du courant.

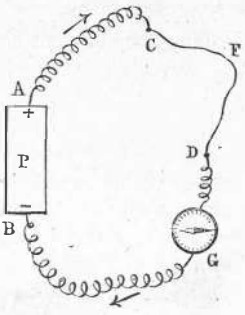


Fig. 565.

Si maintenant on substitue au fil F un autre fil F′, on constate en général, par l'observation du galvanomètre, que la diminution d'intensité du courant n'est plus la même : elle varie, soit avec les dimensions du fil, soit avec sa nature. — En d'autres termes, on doit considérer la *résistance* offerte par un conducteur déterminé comme dépendant à la fois, de sa longueur, de sa section et de sa nature. — C'est ce que nous allons maintenant préciser.

792. Différence des potentiels, aux extrémités d'un fil métallique intercalé dans un circuit. — Formule d'Ohm. — Puisqu'il passe sans cesse de l'électricité positive de l'extrémité C à l'extrémité D du conducteur CFD, intercalé dans le circuit de la pile P (*fig.* 565), le potentiel en C doit être plus grand qu'en D. L'expérience montre en effet que si, sans ouvrir le circuit, on relie l'extrémité D au sol, de sorte que le potentiel en D prenne la valeur zéro, et si l'on met l'extrémité C en communication avec un électromètre à quadrants, l'électromètre accuse un potentiel positif v; l'intensité du courant, mesurée par le galvanomètre G, n'est d'ailleurs pas modifiée par l'établissement de ces communications.

En répétant cette expérience avec divers conducteurs, intercalés entre C et D, on pourra mesurer la différence v des potentiels de leurs extrémités. D'autre part, dans ces expériences successives, on pourra faire en sorte, ou bien que l'intensité i du courant, mesurée par le galvanomètre, prenne des valeurs différentes, ou bien qu'elle reprenne toujours une même valeur : il suffira, par exemple, de modifier convenablement, dans chaque expérience, la longueur de la portion AC du circuit. — Les expériences de ce genre conduisent aux résultats suivants :

Avec un même conducteur, la différence de potentiel v varie *proportionnellement à l'intensité* i du courant. — Avec des fils de même nature, mais différant, soit par leur longueur l, soit par leur section s, la différence de potentiel v, pour une même valeur de i, varie *proportionnellement à la longueur* l, et *en raison inverse de la section* s. — On a donc, en désignant par k un coefficient qui dépend de la *nature* du conducteur :

$$v = k\frac{l}{s} \times i, \tag{1}$$

formule que l'on peut écrire

$$i = v\frac{1}{k}\frac{s}{l}. \tag{2}$$

La relation (2) est la *formule d'Ohm*; elle montre que, pour un conducteur cylindrique homogène, dont les deux extrémités sont maintenues à des potentiels dont la différence v est constante, l'*intensité* i *du courant est proportionnelle à la section* s *de ce conducteur*, et *en raison inverse de sa longueur* l (*).

793. Définition précise de la résistance d'un conducteur. — Dans l'expression (1), le facteur $\frac{kl}{s}$ contient toutes les quantités qui caractérisent le conducteur intercalé dans le circuit : si l'on pose

$$\frac{kl}{s} = r,$$

on peut considérer cette quantité r comme définissant la *résistance* du conducteur. — L'expression (2) devient alors

$$i = \frac{v}{r}. \tag{3}$$

794. Unité pratique de résistance : ohm. — Si, dans la formule précédente, on fait $i = 1$ et $v = 1$, il vient $r = 1$. L'*unité de résistance* est donc celle d'un conducteur qui sera parcouru par un courant d'intensité égale à l'unité, lorsque les deux extrémités de ce conducteur présenteront une différence de potentiel égale à l'unité.

En particulier, quand on fait usage des unités pratiques d'électricité, on doit prendre comme *unité pratique de résistance*, celle d'un conducteur qui est parcouru par un courant d'un ampère, lorsque ses deux extrémités présentent une différence de potentiel d'un volt. — Cette unité a reçu le nom d'*ohm*.

(*) Ohm a été conduit à cette formule en considérant l'analogie que présente le phénomène du courant électrique avec la propagation de la chaleur (622).

Il résulte de déterminations expérimentales qui ne peuvent être indiquées ici, que l'ohm peut être représenté par la *résistance à* 0° *d'une colonne de mercure ayant un millimètre carré de section et* 106 *centimètres de longueur.*

795. Étalons de résistance. — Boîtes de résistances. — D'après ce qui vient d'être dit, on pourrait construire un *ohm étalon*, en prenant un tube de verre de 1 millimètre carré de section, et en y introduisant une colonne de mercure de 106 centimètres de longueur; des fils de platine, plongeant dans le mercure à ses extrémités, permettraient d'introduire la colonne de mercure dans le circuit d'un courant. — Mais cet étalon rectiligne serait peu commode. La figure 566 représente un

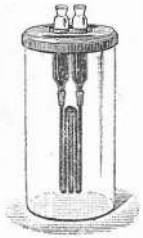


Fig 566
Étalon de l'ohm légal.

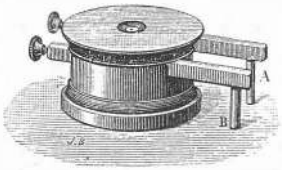


Fig. 567.
Ohm pratique, en fil de maillechort.

étalon dont le tube est replié plusieurs fois. Pour les expériences précises, on a soin de l'entourer de glace fondante, la résistance du mercure éprouvant des variations sensibles avec la température.

Enfin, en raison de la fragilité des instruments de verre, il est préférable de construire les *étalons pratiques* avec des fils métalliques. On choisit le maillechort, dont la résistance varie fort peu avec la température. La figure 567 représente un de ces étalons : le fil est enroulé sur une bobine de bois, contenue dans un étui ; ses deux extrémités sont soudées à des tiges coudées A, B, que l'on peut plonger dans deux godets de mercure, pour établir les communications.

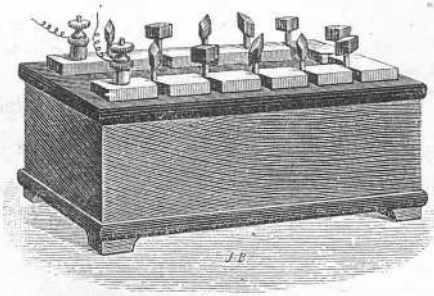


Fig. 568. — Boîte de résistances.

On construit également des bobines dont la résistance est 2, 3, 4, 5, 10, 100, 1000 fois celle de l'ohm. C'est avec ces bobines que l'on forme

des *boites de résistances* (*fig.* 568), qui permettent de faire varier la résistance introduite dans un circuit, et d'évaluer cette résistance par une simple lecture. — Les pièces de cuivre successives A, B, C,... I, K, L (*fig.* 569) peuvent être mises en communication par des chevilles métalliques D, E,... F, G; quand ce conducteur ABC... KL est intercalé dans un circuit, il n'a aucune résistance appréciable. Au-dessous de la cheville D, est placée, dans la boite, une bobine de résistance connue, dont le fil est soudé par ses extrémités aux deux pièces A et B; si l'on

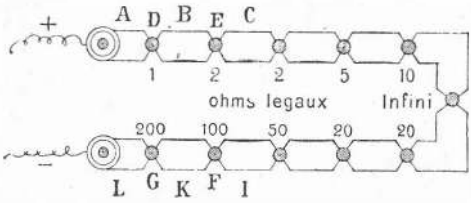


Fig. 569.

enlève la cheville D, on introduit dans le circuit la résistance de cette bobine. A chaque cheville, correspond ainsi une bobine placée au-dessous d'elle, et le nombre d'ohms qui représente la résistance de la bobine est marqué sur la cheville même. — Il suffit donc, dans chaque cas, d'additionner les nombres lus sur les chevilles enlevées, pour connaître la résistance introduite dans le circuit.

796. Coefficients de résistance des corps solides. — Si l'on introduit un fil CFD (fig. 565), ayant une longueur de l mètres et une section de s millimètres carrés, dans un circuit comprenant une pile et un galvanomètre, et si on le remplace ensuite par une boite de résistances, on pourra régler la résistance offerte par la boite de façon que e courant reprenne la même intensité: cette résistance, évaluée *en ohms*, fera connaître la résistance r du fil lui-même (*). La quantité r étant connue, ainsi que l et s, la formule de définition $r = k\frac{l}{s}$ permettra de calculer le coefficient k, pour la substance dont est formé le fil. — Quant à la signification de ce coefficient, on voit que si l'on fait $l = 1^{m}$, et $s = 1^{mmq}$, il vient $k = r$, c'est-à-dire que k représente, pour cette substance, *la résistance, en ohms, d'un fil d'un mètre de longueur et d'un millimètre carré de section.* — C'est ce qu'on appelle le *coefficient de résistance* de la substance dont il s'agit.

Le tableau suivant donne les coefficients de résistance, classés par

(*) Nous indiquerons plus loin (898) une méthode de détermination plus précise de la résistance d'un conducteur.

ordre de valeurs croissantes, pour les corps solides les plus employés comme conducteurs.

	RÉSISTANCE en ohms.		RÉSISTANCE en ohms.
Argent recuit	0,017	Étain comprimé	0,146
Cuivre	0,018	Plomb comprimé	0,217
Or	0,023	Antimoine comprimé	0,392
Aluminium	0,033	Mercure	0,944
Zinc comprimé	0,062	Bismuth comprimé	1,448
Platine	0,100	Coke	45
Fer recuit	0,107	Charbon de cornue	703

On voit que, à égalité de dimensions, les fils de fer offrent une résistance environ six fois plus grande que les fils de cuivre. — La résistance du charbon de cornue ou des charbons agglomérés, qu'on emploie pour les piles de Bunsen ou pour la production de la lumière électrique, est plusieurs centaines de fois plus grande.

797. Coefficients de résistance des liquides. — Les liquides, en général, présentent, à dimensions égales, des résistances incomparablement plus grandes que les corps solides. Voici quelques nombres qui en pourront donner une idée, pour quelques-unes des solutions les plus employées en électricité. — Ces nombres représentent, comme les précédents, les *résistances en ohms*, pour des colonnes d'un mètre de longueur et d'un millimètre carré de section.

	RÉSISTANCE en ohms.
Acide azotique à 36° de l'aréomètre de Baumé	21 560
Solution saturée de sel marin (température 13°)	61 000
— — sulfate de zinc (température 14°)	349 700
— — de cuivre (température 9°)	372 300
Eau acidulée $\left(\frac{1}{20\,000}\right.$ d'acide sulfurique$\left.\right)$	15 700 000

La grandeur de ces nombres fait comprendre pourquoi, quand on intercale une colonne liquide dans le circuit d'une pile, il faut toujours lui donner une grande section et une petite longueur, si l'on veut que le courant conserve une intensité appréciable.

798. Résistance de la pile. — Prenons un élément de pile à tasses (fig. 528), dont les fils P et N seront réunis par un conducteur dans lequel sera intercalé un galvanomètre. Si l'on vient à éloigner progressivement les lames l'une de l'autre, on constate que l'intensité du courant diminue; le liquide, qui, *dans l'élément de pile*, est placé entre les deux lames métalliques, se comporte donc, au point de vue des variations d'intensité du courant, comme se comporterait une couche liquide interposée dans la partie extérieure du circuit. — D'une manière générale, le circuit d'une pile étant fermé par un conducteur quelconque, la résistance *intérieure* de la pile intervient dans la valeur

de l'intensité acquise par le courant, au même titre que les résistances *extérieures*.

799. Résistance totale d'un circuit. — Étant donnée une pile formée d'éléments quelconques, et placée dans un circuit quelconque, on conçoit que l'on puisse évaluer séparément la résistance $\frac{kl}{s}$ de chacun des éléments de pile, à la condition de connaître leurs dimensions et les coefficients de résistance k relatifs aux liquides qu'ils contiennent ; la somme des résistances de tous les éléments donnera la *résistance intérieure* de la pile. — On peut évaluer de même la *résistance extérieure*, en faisant la somme de tous les termes $\frac{kl}{s}$ relatifs à chacun des fils conducteurs qui, réunis bout à bout, constituent le circuit extérieur. — La somme de ces résistances, intérieure et extérieure, sera la *résistance totale* du circuit.

800. Lois d'Ohm. — Supposons que l'on ait évalué, en ohms, la résistance intérieure R d'une pile, et que, au moyen d'un électromètre à quadrants, on ait mesuré, en volts, la différence de potentiel E qui existe entre les deux pôles quand le circuit est ouvert : le nombre E est ce que nous avons appelé la *force électromotrice* de la pile (755). Si l'on vient à réunir les deux pôles par un conducteur de résistance connue r, la différence de potentiel aux deux pôles prend une valeur v, plus petite que E (752), que l'on peut déterminer encore au moyen de l'électromètre à quadrants. Dans tous les cas de ce genre, l'expérience montre que *le rapport de la différence v des potentiels pris aux deux pôles de la pile, en circuit fermé, à la différence E des potentiels pris aux deux pôles, en circuit ouvert, est toujours égal au rapport de la résistance extérieure r à la résistance totale R + r* ; c'est-à-dire qu'on a :

$$\frac{v}{\mathrm{E}} = \frac{r}{\mathrm{R} + r}.$$

Or, d'après ce qu'on a vu (795, formule 3), l'intensité du courant, dans le conducteur extérieur, est exprimée en ampères par $\frac{v}{r}$; c'est aussi l'intensité du courant dans tout le reste du circuit. Mais, d'après la relation qui précède, on a $\frac{v}{r} = \frac{\mathrm{E}}{\mathrm{R} + r}$; par suite, l'intensité du courant peut être représentée par l'expression générale

$$i = \frac{\mathrm{E}}{\mathrm{R} + r},$$

qui met en évidence, d'une part, l'influence de la force électromotrice de la pile ; d'autre part, l'influence de la résistance intérieure de la pile et celle de la résistance extérieure.

De cette relation, découlent les deux lois suivantes, connues sous le nom de *lois d'Ohm* :

1° *L'intensité du courant est proportionnelle à la force électromotrice de la pile.*

2° *Elle est inversement proportionnelle à la résistance totale du circuit.*

801. Vérifications expérimentales. — La seconde loi a été établie expérimentalement par Pouillet, en opérant avec diverses espèces de piles. — Nous nous contenterons d'indiquer le principe de la méthode.

Le cas le plus simple est évidemment celui où la résistance intérieure de la pile est *négligeable* par rapport aux résistances extérieures. C'est le cas des piles *thermo-électriques* (*fig.* 546) : les lames métalliques ou les barreaux qui forment les éléments peuvent être considérés comme ayant une résistance négligeable, par rapport à celle des fils longs et fins qui ferment le circuit. C'est dans ces conditions qu'ont été effectuées les expériences d'Ohm, et aussi les premières expériences de Pouillet. — Or, supposons qu'on ferme successivement le circuit d'une pile thermo-électrique avec différents fils, de résistances connues, et que le circuit contienne un galvanomètre, dont la résistance soit également connue. Si, dans deux expériences consécutives, on représente par i et i' les intensités du courant, mesurées au galvanomètre, et par r et r' les résistances *totales* des conducteurs extérieurs à la pile, y compris celle du fil du galvanomètre, on trouve toujours

$$\frac{i}{i'} = \frac{r'}{r},$$

c'est-à-dire que *les intensités du courant sont en raison inverse des résistances du circuit.*

Supposons maintenant qu'on opère de même avec une pile *hydro-électrique*, dont on ait mesuré la résistance R, et qu'on fasse deux expériences avec des circuits extérieurs ayant des résistances r et r', y compris celle du fil du galvanomètre : on trouve, pour le rapport des intensités i et i',

$$\frac{i}{i'} = \frac{\mathrm{R} + r'}{\mathrm{R} + r}.$$

On peut donc dire, d'une manière générale, que les intensités des courants produits *par une même pile*, dans des circuits diversement constitués, *sont en raison inverse des résistances du circuit tout entier, pile comprise.*

802. Chaleur dégagée dans une partie déterminée du circuit. — Loi de Joule. — Considérons une pile dont les deux pôles présentent, en circuit ouvert, une différence de potentiel de E volts ; si on la place dans un circuit fermé, et si la résistance *totale* du circuit est de R

ohms, l'intensité du courant est exprimée, en ampères, par $i = \frac{E}{R}$; la quantité d'électricité qui traverse le circuit pendant t secondes, est exprimée, en coulombs, par $q = it$.

Or, on a vu (753) que, pour chaque coulomb mis en mouvement dans la pile, le travail des forces électriques de contact est de E joules ; dès lors, pendant t secondes, le travail des forces électriques de contact, c'est-à-dire la diminution d'énergie potentielle de la pile, sera représentée, en joules, par $W = qE$, ou

$$W = E.\ it.$$

Cette énergie disparue dans la pile doit apparaître dans les diverses parties du circuit. — Considérons, en particulier, une portion déterminée du circuit extérieur, et soit r sa résistance en ohms : ses deux extrémités présentent une certaine différence de potentiel de v volts, telle que l'on ait $\frac{v}{E} = \frac{r}{R}$ (800). Pour chaque coulomb transporté d'une extrémité de ce conducteur à l'autre, le travail des forces électriques est exprimé par v; pour le nombre de coulombs q, ou it, transportés en t secondes, le travail, exprimé en joules, est

$$w = v.\ it;$$

c'est l'expression de l'énergie qui doit apparaître dans le conducteur considéré. — On voit que le rapport de cette énergie w qui apparaît dans ce conducteur de résistance r, à l'énergie W qui a disparu dans la pile pendant le même temps, est égal à $\frac{v}{E}$ ou à $\frac{r}{R}$. En d'autres termes, l'énergie potentielle consommée dans la pile, et transformée en énergie électrique, est transmise à chacune des portions du circuit *proportionnellement à sa résistance*.

Si le courant ne produit ni électrolyse, ni mouvement extérieur, cette énergie apparaît sous forme de *chaleur* dégagée. L'équivalent mécanique de la petite calorie étant 4,17 joules, la quantité de chaleur dégagée dans le conducteur considéré sera, en petites calories, $\frac{w}{4,17}$, ou $\frac{v.it}{4,17}$. — Enfin, on peut introduire dans cette expression, au lieu de v, sa valeur en fonction de la résistance r du conducteur. On a vu (793, formule 5) que l'on a $i = \frac{v}{r}$, d'où $v = ir$; l'expression de l'énergie qui apparaît dans ce conducteur devient alors

$$w = i^2rt,$$

et la quantité de chaleur dégagée en t secondes, dans le conducteur considéré, est exprimée par $\frac{i^2rt}{4,17}$. De là, cette loi :

La quantité de chaleur dégagée, dans l'unité de temps, par un courant électrique, dans un conducteur déterminé, est proportionnelle au carré de l'intensité du courant, et à la résistance du conducteur.

Cette loi, que nous venons de déduire de la loi d'Ohm, a été obtenue directement par Joule, au moyen de mesures calorimétriques : elle est connue sous le nom de *loi de Joule.*

Les résultats généraux des expériences suivantes sont conformes à cette loi :

Si, dans un circuit parcouru par un courant un peu intense, sont placés, à la suite les uns des autres, des fils de platine, de fer, de cuivre, d'argent, ayant tous *même section*, on observe qu'ils s'échauffent très inégalement. Les fils de fer ou de platine peuvent être portés à l'incandescence, sans que les fils de cuivre ou d'argent deviennent lumineux : le tableau de la page 645 montre en effet que la résistance, par unité de longueur, est environ six fois plus grande pour le fer ou le platine que pour l'argent ou le cuivre.

Si l'on intercale, dans le circuit d'une pile formée de quelques éléments Bunsen, un fil fin, de fer ou de platine, ce fil devient incandescent, et peut même fondre ou se volatiliser si le courant a une intensité suffisante ; les gros fils de cuivre, qui forment le reste du circuit, s'échauffent généralement peu, leur coefficient de résistance étant beaucoup moindre, et leur section étant beaucoup plus grande.

Le charbon ayant un coefficient de résistance considérable, un fil fin de charbon peut devenir incandescent sous l'action d'un courant dont l'intensité n'est pas très considérable : c'est sur cette propriété que sont fondées les lampes électriques à incandescence.

II. — DIVERS MODES D'ASSOCIATION DES ÉLÉMENTS DE PILE. COURANTS DÉRIVÉS.

803. Association des éléments de pile en série. — Le mode d'association que nous avons employé jusqu'ici, pour les éléments de pile, est connu sous le nom d'*association en série*, ou *en tension*. — Prenons n éléments identiques, soit e la force électromotrice en volts et ρ la résistance en ohms, de chacun d'eux ; réunissons ces éléments par les pôles de noms contraires (*fig.* 570), et fermons le circuit par un conducteur C, de résistance r. La force électromotrice de la pile tout entière étant $E = ne$, et la résistance totale du circuit étant $R = n\rho + r$, l'intensité du courant est, d'après les lois d'Ohm (800) :

$$I = \frac{ne}{n\rho + r}.$$

Ce mode d'association convient spécialement au cas où le conducteur extérieur présente une résistance *très grande* par rapport à celle de la pile. — En effet, en considérant np comme négligeable vis-à-vis de r, on a sensiblement $I = \frac{ne}{r}$, c'est-à-dire que l'intensité est sensiblement proportionnelle au nombre des éléments (*).

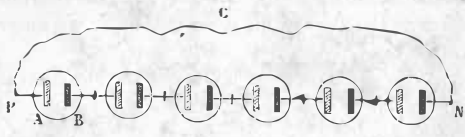


Fig. 570. — Association en série.

804. Association des éléments de pile en batterie — On désigne sous le nom d'*association en batterie* ou *en surface*, le mode d'association dans lequel les pôles de même nom sont réunis entre eux (*fig.* 571), de sorte que le conducteur extérieur C réunit l'ensemble P de tous les pôles positifs, à l'ensemble N de tous les pôles négatifs. — Si l'on considère un système formé de n éléments égaux, de résistance ρ, ainsi associés, le système se comporte comme *un seul élément*, dont les lames auraient une surface n fois plus grande. Par suite, puisque la résistance d'une colonne liquide est en raison inverse de sa section, la résistance de cet *élément multiple* est $\frac{\rho}{n}$. Mais, comme la force électromotrice d'un élément de pile est indépendante de sa surface, et ne dépend que de la nature des corps qui le forment, la force électromotrice de cet élément multiple sera toujours e. Si donc on désigne par J l'intensité du courant produit, on aura, en désignant par r la résistance du conducteur C :

$$J = \frac{e}{\frac{\rho}{n} + r}.$$

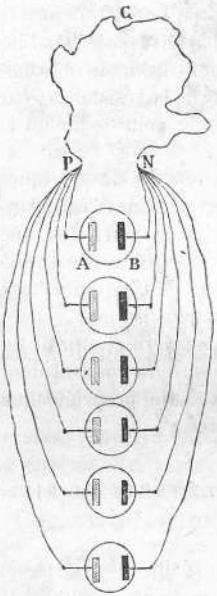


Fig. 571.
Association en batterie.

Ce mode d'association *en surface*, qui est celui où la pile offre le moins de résistance, convient spécialement au cas où le conducteur extérieur présente une résistance *très petite* par rapport à celle de chacun des éléments de la pile. — En effet, en

(*) C'est toujours *en série* qu'on associe les couples *thermo-électriques*, quand le courant doit traverser des fils métalliques fins, incomparablement plus résistants que les couples eux-mêmes. — C'est encore en série que l'on associe les couples *hydro-électriques*, quand le courant doit traverser des corps présentant une résistance considérable, comme des colonnes liquides d'une certaine épaisseur.

considérant r comme négligeable vis-à-vis de $\frac{\rho}{n}$, on a sensiblement $J = \frac{ne}{\rho}$, ce qui montre que, dans ce cas, l'intensité J est sensiblement *proportionnelle au nombre des éléments* (*).

805. Association des éléments de pile en plusieurs séries, réunies en batterie. — Entre les deux cas extrêmes que nous avons spécialement considérés, se présentent des cas intermédiaires, où la résistance du conducteur extérieur est comparable à celle d'un ou plusieurs éléments de la pile. On groupe alors les éléments en un certain nombre de séries, et l'on réunit en batterie ces séries successives. — Si l'on a, par exemple, six éléments, on pourra les réunir, ou en deux séries formées chacune de trois éléments (*fig.* 572), ou en trois séries formées chacune de deux éléments (fig. 573). — Le calcul montre que, dans

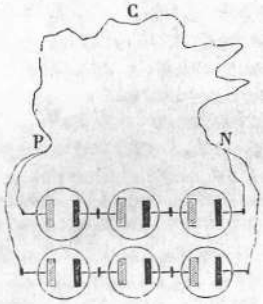


Fig. 572.

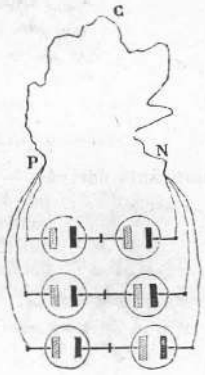


Fig. 573.

chaque cas particulier, la disposition qui donne le courant d'intensité maximum est celle pour laquelle *la résistance de la pile est aussi voisine que possible de la résistance du conducteur extérieur.*

Soit N le nombre total des éléments dont on dispose ; désignons par m le nombre des éléments de chaque série, et par n le nombre des séries accouplées en batterie, en sorte qu'on ait $m \times n = N$. — D'après ce qui précède, chaque série a alors une force électromotrice me et une résistance $m\rho$: dès lors, la batterie

(*) L'association *en surface* convient, par exemple, au cas où l'on veut, avec des piles hydro-électriques, amener à l'incandescence des fils métalliques, toujours beaucoup moins résistants que la pile elle-même. — C'est pour la même raison qu'il y a avantage, dans les expériences de ce genre, à employer des éléments à *grande surface*. Ainsi, un simple couple de Wollaston suffit pour fondre un fil de platine fin (*fig.* 559) qui serait à peine rougi par une pile à colonne, formée d'un grand nombre d'éléments à petite surface.

formée par n de ces séries a la même force électromotrice me que chacune des séries, mais sa résistance est n fois plus petite, $\frac{m\rho}{n}$; si r est la résistance extérieure, l'intensité du courant est alors

$$i = \frac{me}{\frac{m\rho}{n} + r} = \frac{e}{\frac{\rho}{n} + \frac{r}{m}}.$$

Pour que l'intensité i ait une valeur maximum, il faut que le dénominateur soit minimum. Or remarquons que le produit de ses deux termes est constant, puisqu'il est égal à $\rho \frac{r}{N}$; dès lors, d'après un théorème connu, la somme des deux termes sera minimum quand ils seront égaux entre eux Donc l'intensité sera maximum quand on aura

$$\frac{\rho}{n} = \frac{r}{m}, \quad \text{ou} \quad \frac{m}{n} = \frac{r}{\rho}$$

On devra adopter la disposition pour laquelle le rapport des nombres m et n sera le plus voisin de cette valeur.

Si cette relation est satisfaite, on a $\frac{m\rho}{n} = r$; la résistance de la pile est donc *égale à la résistance du conducteur extérieur.*

806. Courants dérivés. — Supposons que, dans un circuit contenant une pile P, se trouvent intercalés deux fils, F, F′, aboutissant aux mêmes points C et D (*fig.* 574). Les courants qui traversent ces fils dans le même sens, et qu'on nomme *courants dérivés*, acquièrent des intensités dont les lois ont été données par Ohm.

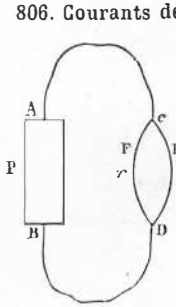


Fig. 574.
Courants dérivés.

Et d'abord, la *somme* des quantités d'électricité qu traversent les fils F et F′, pendant un temps déterminé, étant égale à la quantité d'électricité qui traverse la partie non divisée DPC pendant le même temps (787), si l'on désigne par i et i' les intensités du courant dans les deux fils de dérivation, et par I l'intensité dans la partie non divisée, on doit avoir

$$(1) \qquad I = i + i'.$$

Or, si v est la différence des potentiels aux points C et D, et si l'on désigne par r et r' les résistances des fils F et F′, on a, d'après ce qu'on a vu (795, formule 3), $i = \frac{v}{r}$, $i' = \frac{v}{r'}$; par suite l'équation (1 devient

$$I = v\left(\frac{1}{r} + \frac{1}{r'}\right) = v\,\frac{r + r'}{rr'}.$$

Si l'on veut exprimer ce résultat en langage ordinaire, on peut dire que l'ensemble des deux fils de dérivation se comporte comme un *conducteur unique* dont la résistance serait $\frac{rr'}{r + r'}$. Il s'ensuit que, si E est la force électromotrice

de la pile, et si R est la résistance totale de la partie non divisée du circuit, l'intensité I du courant, dans la partie non divisée, est exprimée par

$$(2) \qquad I = \frac{E}{R + \frac{rr'}{r + r'}}.$$

Quant aux intensités i et i' dans les deux fils de déviation, elles sont *en raison inverse de leurs résistances*, $\frac{i}{i'} = \frac{r'}{r}$; par suite, en tenant compte de la relation (1), il vient :

$$(3) \qquad i = I\frac{r'}{r + r'} \qquad i' = I\frac{r}{r + r'}.$$

Remarque. — Pour *un nombre quelconque de dérivations*, on obtiendrait les valeurs des intensités dans chaque fil, en faisant usage du théorème suivant, qui a été démontré par M. Kirchoff, et que nous nous contenterons d'énoncer :

Lorsque, dans un réseau quelconque de conducteurs, on considère une suite continue de conducteurs, de résistances r, r', r''..., *formant un circuit fermé* et contenant une force électromotrice E, si l'on désigne par i, i', i''... les intensités du courant dans chacun des conducteurs, on a toujours

$$E = ir + i'r' + i''r'' \ldots$$

Dans le cas où les dérivations sont au nombre de deux, on a, en appliquant successivement le théorème aux deux circuits fermés CFDPC et CF'DPC,

$$(4) \qquad E = ir + IR \qquad E = i'r' + IR.$$

Ces deux équations, combinées avec l'équation (1), conduisent aux relations (2) et (3).

807. Pont de Wheatstone. — Supposons que, les pôles d'une pile P aboutissant à des points C et D (*fig.* 575), on réunisse ces points par deux dérivations formées, l'une de deux conducteurs A et R, dont les résistances seront a et r, et qui seront placés bout à bout; l'autre, de deux conducteurs B et S, dont les résistances seront b et s, et qui seront également placés bout à bout. Supposons enfin que les points de jonction M et N des deux systèmes soient réunis par un conducteur MN comprenant un galvanomètre G; c'est ce conducteur MN qu'on appelle le *pont*.

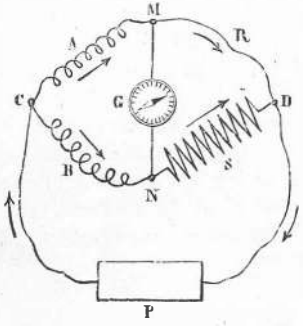


Fig. 575. — Pont de Wheatstone.

Cherchons quelle est la relation qui doit exister entre les résistances a, b, r, s, pour que, dans ce réseau de conducteurs, le fil MN ne soit traversé par *aucun courant*, c'est-à-dire pour que l'aiguille du galvanomètre n'éprouve aucune déviation. Pour cela, remarquons que, s'il

ne passe aucune quantité d'électricité par MN, on peut affirmer que le courant a une même intensité i dans le conducteur A et dans le conducteur R, et une même intensité i' dans le conducteur B et dans le conducteur S. Dès lors, si l'on désigne par c, m, d, n, les valeurs des potentiels aux points C, M, D et N, on a identiquement :

$$i = \frac{c - m}{a} = \frac{m - d}{r}, \qquad i' = \frac{c - n}{b} = \frac{n - d}{s};$$

or, puisqu'il n'y a pas de courant de M en N, les potentiels en M et N sont égaux, c'est-à-dire que l'on a $m = n$; on en déduit

$$\frac{i}{i'} = \frac{b}{a} = \frac{s}{r};$$

c'est-à-dire que, s'il ne passe aucun courant par le pont, les résistances des conducteurs situées *au delà du pont* sont dans le même rapport que les résistances des conducteurs situés *en deçà*.

Nous allons voir comment on fait usage de ce résultat, pour la détermination expérimentale des résistances des conducteurs.

III. — MESURE DES RÉSISTANCES DES CONDUCTEURS. CONSTANTES DES PILES.

808. Détermination expérimentale de la résistance d'un conducteur par la méthode du pont de Wheatstone. — La méthode qui a été indiquée précédemment (796), pour déterminer la résistance d'un conducteur, ne présente qu'une précision insuffisante, quand on l'applique à un fil dont la résistance est faible par rapport à celle de la pile : l'interposition de ce fil dans le circuit ne fait pas varier sensiblement l'indication du galvanomètre. — Il est préférable d'employer la méthode du pont de Wheatstone.

Pour mesurer la résistance d'un fil déterminé, on placera en A et en B (*fig.* 575) deux bobines, de résistances connues a et b ; en R, le fil qui est l'objet de l'expérience ; en S, une *boîte de résistances* (*fig.* 568). On déterminera, par tâtonnements, le nombre d'ohms s qu'on devra prendre, pour que le galvanomètre du pont reste au zéro ; on en déduira la valeur de r, en ohms :

$$r = s\frac{a}{b}$$

Remarque. — On emploie quelquefois une disposition un peu différente, qui dispense de l'emploi d'une boîte de résistances. — On place en A (*fig.* 576) une bobine, dont la résistance a est connue en ohms ;

en R, le fil qui est l'objet de l'expérience; entre C et D, est un fil rectiligne, tendu sur une règle divisée. Sur ce fil est disposée une petite pièce métallique N, qui est mobile sur le fil lui-même, et à laquelle vient aboutir l'extrémité du conducteur MGN qui forme le *pont*. On règle, par tâtonnements, la position de la pièce N sur le fil, de manière que

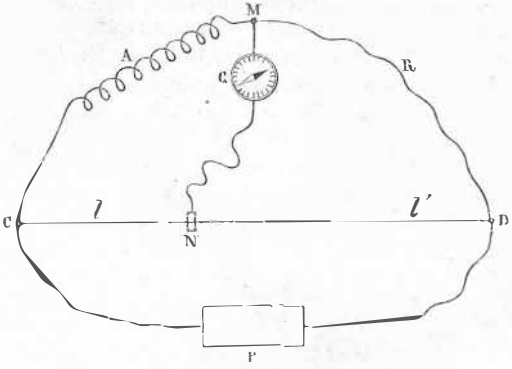


Fig. 576. — Pont à corde.

l'aiguille du galvanomètre reste au zéro; en lisant alors sur la règle divisée les deux longueurs CN et ND, et désignant ces longueurs par l et l', on a

$$\frac{r}{l'} = \frac{a}{l} \qquad \text{ou} \qquad r = a\frac{l'}{l};$$

la résistance a de la bobine étant donnée en ohms, on obtient ainsi la valeur de r, évaluée avec la même unité.

809. Détermination expérimentale des constantes d'une pile. — D'après ce que nous avons vu (800), une pile placée dans un circuit intervient à la fois par sa *résistance* et par sa *force électromotrice*. Ce sont les deux *constantes* qui caractérisent la pile, et qu'il importe, dans la pratique, de déterminer expérimentalement.

Une fois la pile installée, on en peut mesurer la *résistance* par diverses méthodes. La plupart de ces méthodes consistent à mesurer les variations qu'éprouve l'intensité du courant, quand on le fait passer dans des conducteurs de résistances connues, que l'on intercale successivement entre les deux pôles de la pile. La formule déduite des lois d'Ohm, $i = \frac{E}{R + r}$, fournit autant d'équations qu'on a effectué d'expériences : il suffit, en général, de deux équations, entre lesquelles on élimine la force électromotrice E, pour déterminer la résistance R de la pile. — On trouve ainsi, comme on pouvait le prévoir, que la résistance R présente des valeurs très diverses, même pour des éléments

de piles d'un même système, selon les dimensions de ces éléments, les épaisseurs des couches liquides, etc.

Au contraire, la *force électromotrice* d'un élément de pile dépend uniquement de la *nature* des substances qui le composent, et nullement de ses dimensions. On peut la déterminer au moyen de l'électromètre à quadrants, en évaluant la différence des potentiels aux deux pôles de l'élément, en circuit ouvert. — Mais, en raison des phénomènes de polarisation (777), il arrive généralement que la force électromotrice, en circuit fermé, diminue peu à peu jusqu'à ce qu'elle ait pris une valeur constante. C'est cette force électromotrice *limite*, en circuit fermé, qu'il importe surtout de déterminer pour chaque espèce d'éléments.

Pour mesurer la force électromotrice e d'un élément de pile, *en circuit fermé*, la méthode la plus simple est la suivante. — On ferme d'abord le circuit avec un fil métallique long et fin, dans lequel est intercalé un galvanomètre : soient ρ la résistance de l'élément de pile, que nous supposons préalablement connue, et r la résistance de la partie extérieure; soit I l'intensité du courant, donnée par le galvanomètre. — On remplace ensuite cet élément de pile, dans le même circuit, par un élément d'espèce différente, dont on connaît la force électromotrice e' en volts : ce sera, par exemple, un élément de Daniell, ou l'élément à azotate de cuivre que nous avons indiqué (765, *Rem.*) ; soient ρ' la résistance de cet élément, et I' l'intensité du courant, fournie par le galvanomètre. — Les lois d'Ohm donnent :

$$I = \frac{e}{\rho + r}, \qquad I' = \frac{e'}{\rho' + r}, \qquad \text{d'où} \qquad \frac{e}{e'} = \frac{I(\rho + r)}{I'(\rho' + r)}.$$

La valeur de e' étant supposée connue en volts, on en déduira la valeur de e, évaluée avec la même unité. — On voit que, si la résistance extérieure r est choisie de manière qu'elle soit très grande par rapport à ρ et à ρ' (*), on pourra considérer les termes $\rho + r$ et $\rho' + r$ comme sensiblement égaux, et poser simplement

$$\frac{e}{e'} = \frac{I}{I'}.$$

Le tableau suivant donne les forces électromotrices, classées par ordre de valeurs croissantes, pour les éléments de pile les plus employés :

	FORCE ÉLECTROMOTRICE en volts.
Élément de Daniell	1,08
— de Grove	1,9
— de Bunsen	1,9
— de Leclanché	1,5
— de pile secondaire de Planté (au début)	2,5

(*) Pour que la résistance extérieure soit très grande par rapport à celle de l'élément de pile, on peut intercaler dans le circuit une boîte de résistances (*fig.* 568), dont on a enlevé la cheville marquée *infini* (*fig.* 569).

810. Force électromotrice des piles thermo-électriques. — Les éléments de piles *thermo-électriques* (767) sont remarquables par la faiblesse de leur force électromotrice, qui est toujours une très petite fraction de volt.

Pour chaque espèce d'élément thermo-électrique, la force électromotrice est sensiblement *proportionnelle à la différence de température des deux soudures*, au moins tant que cette différence ne dépasse pas certaines limites.

IV. — CHOIX DES UNITÉS ÉLECTRIQUES.

811. Unités électrostatiques C.G.S. rejetées par le Congrès des électriciens. — Les unités électrostatiques C.G.S. de masse électrique et de potentiel ont été choisies (644 et 668) de manière que les formules auxquelles on est conduit, dans l'étude de l'*Électricité statique*, ne contiennent aucun facteur numérique différent de l'unité. — Par exemple, entre deux masses électriques q et q', placées dans l'air, à une distance de r centimètres, s'exerce une force répulsive représentée, en dynes, par $f = \frac{qq'}{r^2}$. — Pour amener l'unité de masse électrique depuis l'infini jusqu'à une distance r d'une masse électrique q située en un point déterminé, il faut dépenser un travail représenté, en ergs, par $V = \frac{q}{r}$.

On pourrait, en faisant usage de ce même système d'unités, définir *l'unité électrostatique d'intensité de courant* : ce serait l'intensité d'un courant qui transporterait l'unité de masse électrique en une seconde. — Étant donné un circuit parcouru par un courant dont l'intensité serait égale à l'unité ainsi définie, on pourrait trouver deux points du circuit, A et B, présentant une différence de potentiel égale à l'unité de potentiel électrostatique : la résistance du conducteur AB serait *l'unité électrostatique C.G.S. de résistance*.

Mais l'emploi de ces unités électrostatiques, pour l'établissement des formules de l'*Électromagnétisme* et de l'*Électro-dynamique*, exigerait l'introduction d'un facteur numérique dans chacune de ces formules. — C'est pour éviter cette complication que le Congrès des électriciens s'est déterminé à adopter d'autres unités, dérivées des unités fondamentales C.G.S. d'après d'autres conventions, et dites *unités électromagnétiques*.

812. Unités absolues électromagnétiques C.G.S. adoptées par le Congrès des électriciens. — A la suite des travaux effectués par l'Association britannique, le Congrès international des électriciens, réuni à Paris en 1881, a fixé les diverses unités électriques absolues en les rattachant aux unités fondamentales du système C.G.S. par les considérations suivantes :

On définit comme il a été dit (727) l'*unité de masse magnétique* : c'est la masse magnétique qui, agissant sur une masse identique, placée à une distance de *un centimètre*, produit une répulsion égale à *une dyne*.

Imaginons maintenant un conducteur *d'un centimètre de longueur*, ayant la forme d'un *arc de cercle d'un centimètre de rayon*; si ce conducteur est parcouru par un courant, on verra plus loin (816) qu'il exerce, sur une masse magnétique placée en son centre, une action représentée par une force perpendiculaire au plan du cercle, et variable avec l'intensité du courant; si,

pour *l'unité de masse magnétique*, cette force est égale à *une dyne*, l'intensité du courant sera, par définition, l'*unité absolue d'intensité de courant.*

Pour définir maintenant *l'unité de résistance*, imaginons que, dans un circuit parcouru par un courant d'intensité égale à l'unité, se trouve une colonne de mercure de *un millimètre carré de section;* et considérons une longueur de cette colonne telle, que la quantité de chaleur qui y est dégagée, par seconde, soit précisément celle qui est équivalente à *un erg*, c'est-à-dire $\frac{1}{41\,700\,000}$ de petite calorie; la résistance de cette colonne sera, par définition, l'*unité absolue de résistance.*

Enfin, la différence de potentiel des deux extrémités de cette colonne est, par définition, l'*unité absolue de potentiel* ou *de force électromotrice.*

813. Unités pratiques. — Pour les applications, les *unités absolues* de potentiel et de résistance que nous venons de définir seraient beaucoup trop petites : dans les évaluations numériques, elles conduiraient à des nombres beaucoup trop grands pour être d'un emploi commode. — Les *unités pratiques* qui ont été adoptées sont des multiples de ces unités absolues.

L'*ohm* vaut 10^9 unités absolues de résistance. — Le *volt* vaut 10^8 unités absolues de force électromotrice.

Cherchons quelle est, en unités absolues, la valeur de l'*ampère*, définie comme l'intensité du courant que produit une force électromotrice d'un volt, dans un circuit ayant pour résistance totale un ohm. D'après les définitions des unités absolues, quand la force électromotrice est 1, et la résistance 1, l'intensité du courant est 1; si la force électromotrice devient un *volt*, c'est-à-dire 10^8 unités, et si la résistance devient un *ohm*, c'est-à-dire 10^9 unités, d'après les lois d'Ohm, l'intensité du courant devient $\frac{10^8}{10^9} = \frac{1}{10}$; l'*ampère* vaut donc $\frac{1}{10}$ d'unité absolue d'intensité. — Le *coulomb* est la quantité d'électricité débitée, en une seconde, par un courant d'un ampère.

Le *farad* serait la capacité d'un conducteur, qui, chargé d'un coulomb, serait porté au potentiel d'un volt.

Ce qu'il importe de retenir, c'est que les unités pratiques, *coulomb*, *volt*, *ampère*, *ohm*, *farad*, constituent, avec le *joule* (unité pratique de travail, valant 10^7 ergs), un système cohérent d'unités.

CHAPITRE V

ÉLECTROMAGNÉTISME

I. — CHAMPS MAGNÉTIQUES PRODUITS PAR LES COURANTS.

814. Champ magnétique produit par courant rectiligne indéfini. — Loi de Biot et Savart. — Il résulte de l'expérience d'Œrsted (789) qu'un courant rectiligne indéfini crée autour de lui un *champ magnétique* de même nature que celui qui est produit par un aimant.

Si l'on place verticalement un fil rectiligne xy parcouru par un courant (*fig.* 577), et si l'on projette de la limaille de fer sur une feuille de carton horizontale traversée par ce fil, on voit se former un spectre magnétique : les *lignes de force* sont des circonférences concentriques, ayant leur centre sur l'axe du fil. En chaque point, le *sens* de la force magnétique est donné par la règle d'Ampère (789).

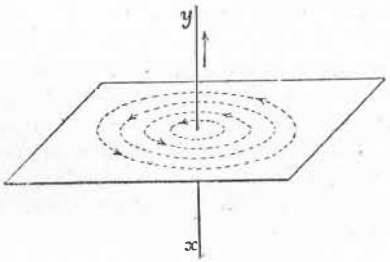
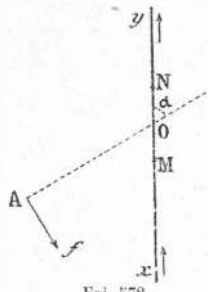


Fig. 577.

Quant à la loi suivant laquelle varie l'*intensité magnétique* dans les divers points de ce champ, les expériences de Biot et Savart ont établi que l'action d'un courant rectiligne indéfini sur un même pôle d'aimant, placé à diverses distances, est *proportionnelle à l'intensité du courant*, et qu'elle varie *en raison inverse de la distance* de ce pôle au courant. — C'est la loi de variation de l'intensité magnétique, aux divers points du champs créé par le courant rectiligne xy.

815. Action d'un élément de courant sur un pôle d'aimant. — Loi de Laplace. — En soumettant la question au calcul, Laplace a montré que l'on peut expliquer les résultats des expériences de Biot et Savart en admettant que l'action exercée individuellement *par chaque élément* MN du courant xy, sur un pôle A (*fig.* 578), est une force f, perpendiculaire au plan AMN, dirigée vers la gauche du courant, suivant

la règle d'Ampère (c'est-à-dire en avant de la figure, dans le cas actuel), proportionnelle à la masse magnétique m du pôle austral considéré, à l'intensité i du courant, à la longueur ε de l'élément de courant, et, en outre, *proportionnelle au sinus de l'angle* α que fait sa direction avec la droite AO menée du pôle à l'élément et *en raison inverse du carré de la distance* AO ou r. C'est ce qu'exprime la formule de Laplace :



Fgi. 578.

$$f = \frac{m}{r^2} i\varepsilon \sin\alpha \ (^*).$$

816. Champ magnétique, à l'intérieur d'un courant fermé, plan et convexe. — Quelle que soit la forme d'un circuit fermé, parcouru par un courant, l'action qu'il exerce sur un pôle d'aimant, placé d'une manière quelconque dans l'espace, est la *résultante* de toutes les forces f dues aux actions individuelles de ses divers éléments rectilignes, forces qui sont déterminées, en direction, en sens et en grandeur, par la loi de Laplace. — Par suite, en *chaque point* du champ magnétique produit par le courant, l'*intensité magnétique*, c'est-à-dire la force que le courant développerait sur l'*unité de masse magnétique australe*, supposée placée en ce point, est complètement définie.

Dans le cas particulier où le circuit fermé a une forme *plane et convexe*, si l'on considère un point quelconque pris *dans le plan et à l'intérieur du circuit*, l'intensité magnétique en ce point est *la somme* des forces dues aux divers éléments rectilignes du courant. — On voit en effet que, dans ce cas, toutes ces forces sont perpendiculaires au plan du courant, et dirigées vers la gauche d'un observateur couché dans une portion quelconque du circuit fermé, de manière que le courant entre par ses pieds et sorte par sa tête, son visage étant tourné vers l'intérieur du circuit : c'est ce que l'on peut appeler la *gauche du courant fermé.*

On peut dire encore que, dans ce cas, les lignes de force magnétique traversent normalement le plan du courant, *en pénétrant par la droite, et en sortant par la gauche du courant fermé.*

On trouve une application de cette forme de circuit dans la dispo-

(*) Quand on fait usage des unités C.G.S., si l'intensité i du courant est évaluée avec *l'unité absolue électromagnétique* (812), la valeur de la force f, calculée par la formule de Laplace, est exprimée *en dynes*. — En faisant la somme de toutes les actions élémentaires, on trouve que l'action *totale* du courant rectiligne indéfini xy est représentée, en dynes, par $\frac{2mi}{a}$, en désignant par a la distance du pôle A au courant xy.

Si l'intensité i était évaluée avec l'unité électrostatique (811), il faudrait introduire, dans ces formules, le coefficient numérique $\frac{1}{3 \times 10^{10}}$. — C'est pour éviter cette complication que le Congrès des électriciens a rejeté l'emploi des unités électrostatiques.

sition que nous rencontrerons plus loin, pour la construction du galvanomètre (819). — Un fil conducteur ABCDF (*fig.* 579) étant replié en rectangle et orienté dans le méridien magnétique, une aiguille aimantée mobile *ab* se place en équilibre, sous l'action de la Terre, dans le plan du rectangle. Si l'on vient à réunir les deux extrémités A et F du fil aux deux pôles d'une pile, on voit l'aiguille se mettre en mouvement : si le courant a le sens indiqué par les flèches, le pôle austral de l'aiguille se porte en avant du plan de la figure, c'est-à-dire vers la gauche du courant fermé (*).

Fig. 579.

817. Champ magnétique d'un courant circulaire. — Considérons un courant circulaire CD (*fig.* 580), ayant son centre en O, et situé dans un plan perpendiculaire au plan de la figure. Les lignes tracées sur la figure indiquent la forme des *lignes de force*, dans ce plan. C'est ce que montrerait le spectre magnétique obtenu en plaçant verticalement le plan d'un fil conducteur, courbé en cercle et parcouru par un courant, et en projetant de la limaille de fer sur une feuille de carton horizontale, traversée en C et D par le fil. Le sens des lignes de force est celui qu'indiquent les flèches, en supposant que le courant marche de D en C, en avant du plan de la figure.

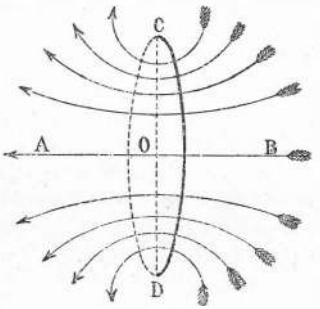


Fig. 580.

Appliquons la loi de Laplace pour calculer, en particulier, l'intensité du champ magnétique *au centre* O d'un courant circulaire d'intensité *i* (*fig.* 580). Soit *a* le rayon OC du cercle ; l'action d'un élément de courant, de longueur ε, sur une masse magnétique égale à l'unité, supposée placée au point O, est $\frac{1}{a} i\varepsilon$; la somme des actions de tous les éléments est donc

$$\frac{1}{a^2} i \times 2\pi a, \quad \text{ou} \quad \frac{2\pi i}{a}.$$

(*) On n'a égard ici qu'aux actions électromagnétiques exercées sur les pôles de l'aiguille par les côtés du rectangle. Il semble qu'il faudrait aussi tenir compte des actions exercées par les deux fils qui relient A et F aux pôles de la pile, et dans lesquels le courant passe en sens contraires. Mais, si ces deux fils sont juxtaposés dans toute la partie extérieure au rectangle, la résultante des actions exercées sur chacun des pôles par leurs éléments pris deux à deux, est identiquement nulle.

Remarque. — Le système de lignes de force que représente la figure 580 est tout à fait semblable à celui que produirait une lame aimantée, qui remplirait l'intérieur du contour circulaire CD, et qui posséderait une couche de magnétisme *austral* sur celle de ses faces qui correspond à la *gauche du courant circulaire fermé*, et une couche de magnétisme boréal sur l'autre face. Cette remarque trouvera son application dans la suite.

818. Champ magnétique d'une bobine formée de courants circulaires ou rectangulaires. — Supposons qu'un fil conducteur, couvert de soie, ait été enroulé, toujours dans le même sens, sur une bobine à section circulaire ou rectangulaire : la figure 581 représente la disposition des lignes de force, à l'intérieur de la bobine, quand on fait passer un courant dans ce fil, de manière que le courant soit ascendant en avant de la figure.

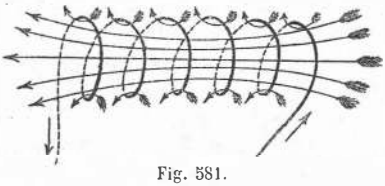


Fig. 581.

Quand la longueur de la bobine, dans le sens de son axe, est *très petite* par rapport au rayon a des spires, c'est-à-dire quand il s'agit d'une bobine *plate*, l'action exercée au centre de la bobine, sur un pôle austral égal à l'unité, est proportionnelle au nombre n des spires ; pour un courant d'intensité i, l'intensité du champ magnétique sera

$$F = \frac{2n\pi}{a} i.$$

Nous allons trouver une application de ce résultat, dans le *multiplicateur de Schweigger*.

II. — GALVANOMÈTRES.

819. Multiplicateur de Schweigger. — Principe des Galvanomètres. — On donne le nom de *galvanomètres*, à des appareils qui permettent de constater l'existence des courants, d'en déterminer le sens, et d'en mesurer l'intensité, par l'observation de la déviation imprimée à une aiguille aimantée.

Nous avons déjà indiqué (790) le principe de la méthode, en supposant le fil conducteur tendu en ligne droite au-dessus de l'aiguille, dans la direction du méridien magnétique. — Si le fil est replié en un rectangle, placé verticalement et orienté dans le méridien magnétique, et si l'aiguille est placée à l'intérieur du rectangle (*fig.* 579), les actions des quatre côtés du rectangle sur les pôles de l'aiguille s'ajoutent, comme on le voit immédiatement en appliquant à ces quatre

parties rectilignes la règle d'Ampère; nous avons vu d'ailleurs qu'il en est toujours ainsi pour un courant plan et fermé, de forme convexe quelconque (816). — La sensibilité de l'appareil est donc ainsi augmentée, puisque cette forme donnée au fil a pour effet de diminuer les distances des pôles de l'aiguille aux parties repliées.

Enfin Schweigger a eu l'idée d'augmenter encore l'action exercée par le courant, en multipliant autour de l'aiguille les portions du fil qui peuvent agir sur elle. Le fil, recouvert de soie, est enroulé un grand nombre de fois, et toujours dans le même sens, sur un cadre rectangulaire CC (*fig.* 582). Tous les tours ainsi formés sont parcourus dans le même sens par le courant : ils exercent des actions *concordantes* sur une aiguille aimantée *ab*, placée à l'intérieur du cadre. — Si le fil fait quelques centaines de tours, l'appareil pourra fournir une déviation sensible de l'aiguille, sous l'action de courants qui seraient inappréciables par l'expérience d'Œrsted.

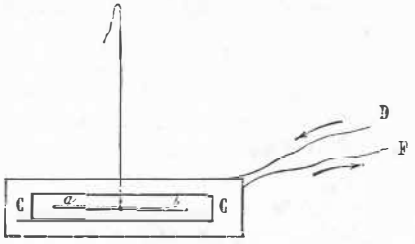


Fig. 582.

Un *galvanomètre* se compose, en général, d'une aiguille aimantée suspendue horizontalement par un fil de cocon, au centre du cadre d'un multiplicateur orienté de façon que le plan de chaque spire soit parallèle au méridien magnétique. — Le passage d'un courant dans le fil est accusé par une déviation de l'aiguille; le sens de la déviation fait connaître le sens du courant; enfin, la grandeur de la déviation augmente avec l'intensité du courant (790).

820. Galvanomètre de Nobili. — Dans le galvanomètre de Nobili, le plus ancien des galvanomètres, on augmente encore la sensibilité, en employant un système de deux aiguilles aimantées *ab*, *a'b'*, réunies par une tige de cuivre M (*fig.* 583), et placées parallèlement, mais de façon que leurs pôles contraires se correspondent ; l'aiguille inférieure *ab* est placée à l'intérieur du cadre du multiplicateur, l'aiguille supérieure est en dehors du cadre.

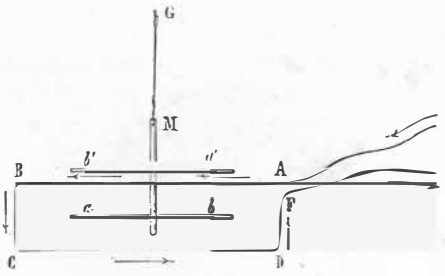


Fig. 583.

Si les deux aiguilles avaient le même moment magnétique, les actions exercées par la Terre sur leurs pôles se neutraliseraient, et le système resterait en équilibre, quelle que fût son orientation. C'est ce que l'on exprime en disant que le système serait complètement *astatique*. — Mais l'une des aiguilles possède toujours un moment magnétique un peu plus grand que l'autre, en sorte que la Terre conserve sur le système une action directrice, égale à la *différence* des actions qu'elle exerce sur chacune des aiguilles. On conçoit que cette action directrice puisse être très faible.

Supposons maintenant qu'un courant se propage dans le fil du multiplicateur, dans le sens des flèches. Nous avons déjà montré (819) que les quatre côtés du rectangle agissent sur l'aiguille intérieure *ab*, de manière à solliciter le pôle austral *a* en avant du plan de la figure. — Quant à l'action sur l'aiguille extérieure, on voit, en appliquant la règle d'Ampère, que le côté AB, le plus voisin de cette aiguille, tend à porter le pôle austral *a'* en arrière du plan de la figure, et par suite le pôle *b'* en avant : cette action concorde avec celles que le rectangle exerce sur l'aiguille intérieure. Les actions exercées sur *a'b'* par les trois autres côtés, BC, CD, DF, seraient inverses ; mais, comme ces côtés sont beaucoup plus éloignés de l'aiguille *a'b'* que le côté AB, c'est l'action de AB qui est prédominante. — En définitive, l'action du rectangle tout entier sur l'aiguille extérieure *s'ajoute* à l'action exercée sur l'aiguille intérieure, pour solliciter *le système* dans le même sens.

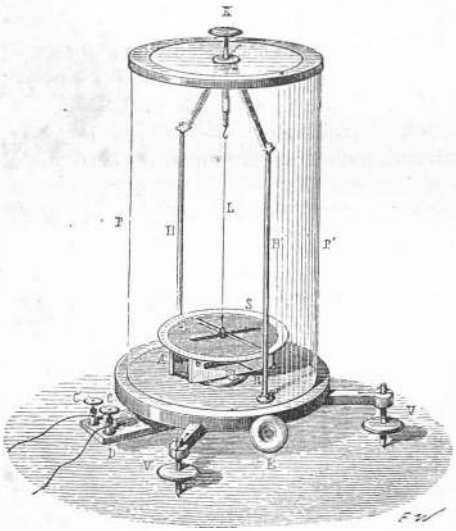


Fig. 584. — Galvanomètre de Nobili.

En résumé, l'emploi d'un système *presque astatique* de deux aiguilles offre deux avantages : 1° de *diminuer* considérablement l'action de la terre ;

2° *D'augmenter* l'action du courant.

Pour ces deux raisons, la sensibilité devient beaucoup plus grande.

La figure 584 représente le galvanomètre de Nobili. — Le système des aiguilles est suspendu, par un fil de

cocon L, à un bouton K, que l'on peut faire monter ou descendre de petites quantités ; AB est le cadre du multiplicateur; les deux extrémités du fil aboutissent à deux bornes métalliques C et C′, fixées sur une planchette d'ivoire D. L'aiguille inférieure est au milieu du cadre (on en peut voir une petite partie sur la figure); l'aiguille supérieure est en dehors du cadre, au dessus d'un cercle de cuivre S, dont le contour est divisé en degrés; le diamètre qui passe par le zéro est parallèle aux tours du fil. — Une cloche de verre PP′ préserve les aiguilles des agitations de l'air.

Pour mettre le galvanomètre en expérience, après avoir relevé le bouton K, ce qui permet aux aiguilles de se placer dans le méridien magnétique, on fait tourner le cadre et le cercle autour de leur axe vertical, au moyen d'un engrenage qui correspond au bouton extérieur E, jusqu'à ce que le zéro de la graduation vienne se placer sous l'une des extrémités de l'aiguille extérieure. — On introduit alors le fil du galvanomètre, par l'intermédiaire des bornes C, C′, dans le circuit soumis à l'expérience. Si le circuit est parcouru par un courant appréciable, le sens de la déviation fait connaître la *direction* de ce courant dans le fil. Quant à son *intensité*, on peut la considérer comme *proportionnelle à la déviation*, tant que la déviation ne dépasse pas quinze ou vingt degrés; pour de plus grandes déviations, il est nécessaire de construire une table de graduation (*).

821. Choix du galvanomètre, selon l'usage auquel il est destiné. — On construit le multiplicateur du galvanomètre de Nobili, et de tous les galvanomètres en général, tantôt avec un fil *gros et court*, tantôt avec un fil *long et fin*.

Lorsqu'il s'agit, par exemple, d'étudier les courants que produisent les sources thermo-électriques, dont la résistance est négligeable, le galvanomètre ne doit présenter lui-même qu'une faible résistance, afin de ne pas trop affaiblir les intensités de ces courants; on emploie donc, dans ce cas, un fil *gros et court*. Ce fil ne fait qu'un petit nombre de tours sur le cadre (30 à 300 tours) : tel est le galvanomètre associé à la pile de Melloni, dans le thermomultiplicateur (603).

(*) La construction d'une table de graduation est particulièrement facile avec les galvanomètres *à deux fils*. — L'instrument porte, enroulés sur le cadre, deux fils métalliques, de même diamètre et de même longueur, couverts de soie et tordus ensemble; les quatre extrémités communiquent avec quatre bornes métalliques. — Admettons que, jusqu'à 20°, on considère les intensités comme proportionnelles aux déviations. Supposons qu'un premier courant, passant dans l'un des fils, donne une déviation de 13°; qu'un second courant, passant dans l'autre fil, donne une déviation de 19°. Si on les fait passer simultanément et dans le même sens, ils équivaudront à un seul courant, dont l'intensité serait 32 : si donc on n'obtient qu'une déviation de 30°, on inscrira dans la table, en regard de la déviation 30°, l'intensité 32.

Le galvanomètre à deux fils est souvent désigné sous le nom de *galvanomètre différentiel* : il permet d'apprécier la *différence d'intensité* de deux courants, en les faisant passer simultanément, mais en sens contraire, l'un dans un fil, l'autre dans l'autre.

Au contraire, lorsque la résistance du circuit extérieur au galvanomètre est très grande, il y a avantage à employer un multiplicateur comportant un grand nombre de spires, c'est-à-dire à fil *long et fin*. Dans ces galvanomètres, à *grande résistance*, le fil fait parfois plusieurs milliers de tours sur son cadre.

En général, dans la construction d'une bobine de dimensions déterminées, on doit, pour obtenir le maximum d'action électromagnétique, choisir les dimensions du fil de façon que la résistance de la bobine soit *aussi voisine que possible de la résistance* R *du reste du circuit* dans lequel la bobine doit être intercalée.

En effet, soient l et s la longueur et la section inconnues du fil de cuivre enroulé sur la bobine; les dimensions que doit avoir la bobine déterminent le volume v du fil : on doit avoir :

(1) $$v = ls.$$

Soit k le coefficient de résistance du cuivre (796); la résistance de la bobine est $\frac{kl}{s}$, et l'intensité i du courant produit par une force électromotrice E, dans le circuit dont la résistance totale est $\mathrm{R} + \frac{kl}{s}$, est donnée par la formule

$$i = \frac{\mathrm{E}}{\mathrm{R} + \frac{kl}{s}}.$$

Soit p la longueur moyenne de chaque spire; le nombre de tours du fil sera $n = \frac{l}{p}$. L'intensité du champ magnétique, au centre de la bobine, et par suite l'action du courant sur chacun des pôles de l'aiguille, sera proportionnelle au produit ni, ou

$$\frac{l}{p} \times \frac{\mathrm{E}}{\mathrm{R} + \frac{kl}{s}},$$

que l'on peut écrire

$$\frac{\mathrm{E}}{p\left[\frac{\mathrm{R}}{l} + \frac{k}{s}\right]}$$

— Pour que cette expression soit *maximum*, il faut que le dénominateur $\frac{\mathrm{R}}{l} + \frac{k}{s}$ soit minimum; or le produit de ses deux termes, $\frac{\mathrm{R}}{l} \times \frac{k}{s}$ ou $\frac{\mathrm{R}k}{v}$ est constant : dès lors, le minimum aura lieu quand on aura $\frac{\mathrm{R}}{l} = \frac{\mathrm{K}}{s}$, ou

(2) $$\mathrm{R} = \frac{kl}{s}.$$

Les équations (1) et (2) font connaître l et s. — L'équation (2) exprime que pour ces dimensions correspondantes au maximum d'action, la résistance $\frac{kl}{s}$ du fil de la bobine est *égale à la résistance* R *du reste du circuit*.

822. Galvanomètre de Bourbouze — Le galvanomètre de Bourbouze (*fig.* 585) est destiné spécialement aux expériences de cours.

L'aimant sur lequel doit agir le courant est un barreau d'acier BB′ (*fig.* 586), mobile comme un fléau de balance, sur un couteau d'acier reposant sur un plan d'agate : il est muni d'une aiguille A, qui lui est perpendiculaire, et qui se déplace, par les mouvements du barreau, sur un cadran divisé. Deux petites masses m, m', mobiles à vis sur une tige parallèle au barreau, permettent

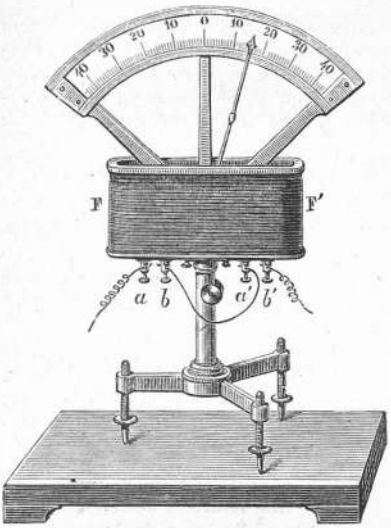


Fig. 585. — Galvanomètre de Bourbouze.

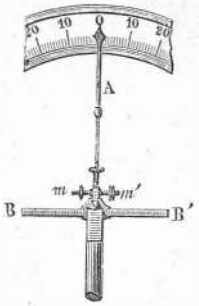


Fig. 586.

d'effectuer un réglage préalable, de manière que, quelle que soit l'orientation de l'appareil, le barreau se place en équilibre dans la position horizontale, l'aiguille A venant alors au zéro de la graduation. — Le barreau et son support sont à l'intérieur d'un multiplicateur FF′ (*fig.* 585). — Lorsque l'instrument est bien réglé, on obtient des déviations appréciables, même avec des courants d'une assez faible intensité.

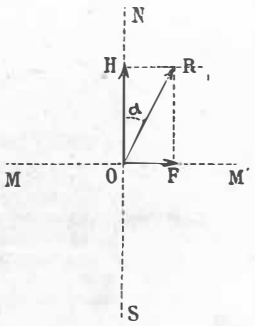


Fig. 587.

823. Galvanomètre pour la mesure précise des intensités des courants. — Dans les galvanomètres de construction moderne, destinés à la mesure précise des intensités des courants, l'aiguille aimantée est généralement *très courte* ; elle est suspendue horizontalement par un fil de cocon, au centre O d'un multiplicateur, dont l'axe, dirigé suivant MM′ (*fig.* 587), est perpendiculaire au méridien magnétique NS, c'est-à-dire à la direction que prend l'aiguille sous l'action de la Terre seule. — Soit H la composante horizontale de la force magnétique terrestre. Quand un courant, d'intensité i, passe dans le multiplicateur, il produit, au centre O du cadre, un second champ magnétique dont l'intensité F,

dirigée suivant l'axe du cadre, est rigoureusement proportionnelle à l'intensité i du courant; en sorte que l'on a $F = Gi$. Le cofficient G, qui dépend de la forme du cadre, de ses dimensions, et du nombre des spires, est ce qu'on appelle *la constante du galvanomètre*.

Pendant le passage du courant, *l'intensité totale* du champ magnétique, au point O, est la résultante R des intensités H et F; l'intensité du champ est encore la même en tous les points très rapprochés de O. Donc, *si l'aiguille est très courte*, c'est dans la direction de R qu'elle se placera en équilibre. — Si l'on désigne par α l'angle de déviation HOR, on a $F = H \operatorname{tang} \alpha$; d'où l'on tire, en remplaçant F par Gi,

$$(1) \qquad i = \frac{H}{G} \operatorname{tang} \alpha.$$

On mesure l'angle α par la méthode optique (478), en fixant à l'aimant un petit miroir dont la surface réfléchissante passe par son axe de rotation. — On sait mesurer, en unités C.G.S., la composante H dans le lieu où l'on opère. On peut ainsi, par une expérience préalable, mesurer une fois pour toutes la constante G du galvanomètre (*).

824. Galvanomètre de W. Thomson. — Dans le galvanomètre de Sir William Thomson, chacune des deux aiguilles du galvanomètre de Nobili est remplacée par un système de quatre ou cinq lames d'acier, d'environ 8 millimètres de longueur, et disposées parallèlement; les deux groupes de lames (*fig.* 588), qui forment le système astatique, sont réunis entre eux par une tige d'aluminium suspendue par un fil de cocon. Chacun des groupes d'aiguilles est au centre d'un multiplicateur circulaire : pour que les actions du courant s'ajoutent, on le fait passer en sens inverse dans les deux bobines. Pour mesurer les déviations, on fait usage de la méthode optique (478), en fixant un petit miroir métallique contre les lames d'acier du groupe supérieur.

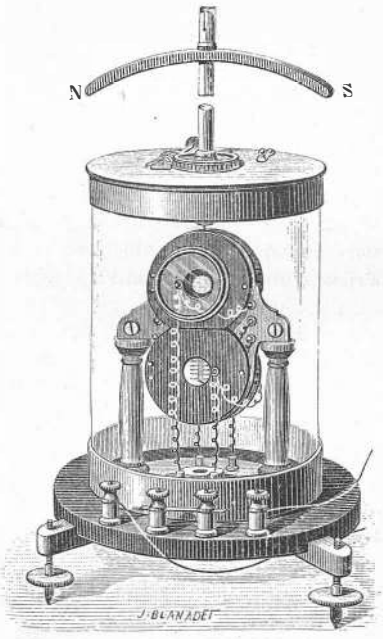


Fig. 588. — Galvanomètre de Thomson.

Il n'est pas nécessaire d'orienter l'appareil dans le méridien magnétique, comme le galvanomètre de Nobili : on peut l'orienter dans

(*) Quand le cadre a une forme simple, cette détermination expérimentale n'est pas

un azimut quelconque; pour amener les aiguilles aimantées à se placer parallèlement aux tours du fil, il suffit de faire tourner autour d'un axe vertical *l'aimant correcteur* NS, jusqu'à ce que le miroir fixé aux aiguilles se tienne en équilibre dans une position perpendiculaire aux axes des bobines.

825. Shunt des galvanomètres. — Un galvanomètre déterminé ne peut servir que pour des courants dont l'intensité ne dépasse pas une certaine limite. En effet, d'une part, si la déviation devient un peu grande, elle cesse d'être observable par la méthode optique; d'autre part, un courant trop intense peut détériorer le galvanomètre. — On appelle *shunt* d'un galvanomètre, un dispositif qui lui est annexé et qui permet de mesurer des intensités de valeurs très diverses, tout en n'observant toujours que des déviations inférieures à une trentaine de degrés.

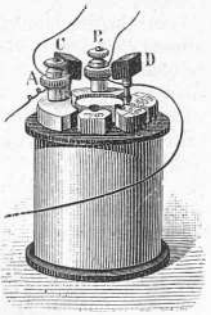


Fig. 589. — Shunt.

Les deux fils qui amènent le courant sont fixés aux deux bornes A, B (*fig.* 589), d'où partent également les fils qui vont au galvanomètre; entre ces deux bornes est une cheville C, de résistance nulle, par laquelle passe tout le courant; l'aiguille du galvanomètre reste alors au zéro. — La borne B communique avec la pièce de cuivre centrale. Trois bobines, dont les résistances sont respectivement $\frac{1}{9}$, $\frac{1}{99}$ et $\frac{1}{999}$ de celle du fil du galvanomètre, communiquent d'une part avec la borne A, d'autre part avec les trois pièces de cuivre marquées $\frac{1}{9}$, $\frac{1}{99}$ et $\frac{1}{999}$: enfin une deuxième cheville D peut être placée entre l'une de ces trois pièces et la pièce centrale. Les chevilles étant disposées comme l'indique la figure 589, aucun courant ne passe dans le galvanomètre.

Supposons maintenant qu'on enlève la cheville C qui est entre les deux bornes; le courant de la pile se partagera entre le fil du galvanomètre, de résistance r, et la troisième bobine, de résistance $r' = \frac{r}{999}$: d'après la formule des courants dérivés (806), $i = I\frac{r'}{r+r'}$, on aura $i = \frac{I}{1000}$; il ne passera donc dans le galvanomètre que la millième partie du courant; si la déviation est sensible, on en fera la lecture, et on multipliera par 1000 l'indication fournie par le galvanomètre.

Si la déviation est insensible, on replacera la cheville C entre les deux bornes, et on transportera la cheville D entre la pièce centrale et la pièce marquée $\frac{1}{99}$; puis on enlèvera la première cheville. S'il y a une déviation,

indispensable. — Quand, par exemple, le multiplicateur est une sorte de bobine très plate, d'environ 20 centimètres de diamètre, portant une seule couche de fil (boussole des tangentes), si l'on désigne par n le nombre des spires, et par a le rayon de chaque spirale, exprimée en centimètres, on a $G = \frac{2n\pi}{a}$ (818). — Si, au contraire, le multiplicateur est une bobine dont la largeur MM' soit égale à deux ou trois fois le diamètre, la constante ne dépend que du nombre n_1 des spirales enroulées sur chaque centimètre de longueur : on a alors $G = 4\pi n_1$ (840). Quand on introduit dans la formule (1) l'une ou l'autre de ces constantes le nombre i est exprimé avec l'*unité absolue électromagnétique*. Pour avoir l'intensité en *ampères*, il faudrait multiplier par 10.

on multipliera par 100 l'intensité mesurée. — Si, cette fois encore, la déviation n'était pas sensible, on replacerait encore la cheville C, on amènerait la cheville D entre la pièce centrale et la pièce $\frac{1}{10}$, puis, retirant la première cheville, on ferait passer dans le galvanomètre la dixième partie du courant. — Enfin, si la sensibilité était encore insuffisante, on ferait passer dans le galvanomètre le courant tout entier, en retirant les deux chevilles.

826. Amortissement des oscillations. — Galvanomètres apériodiques. — Quand on fait passer un courant dans un galvanomètre de Nobili, l'aiguille ne prend une position déterminée, sous l'action du courant, qu'après avoir effectué un grand nombre d'oscillations : elle passe *périodiquement* par sa position d'équilibre, alternativement dans un sens et dans l'autre, et ne se fixe qu'au bout d'un temps assez long.

Pour abréger la durée des mesures, on a dû chercher à *amortir* les oscillations, c'est-à-dire à faire décroître rapidement les amplitudes successives, de telle sorte que, au bout d'un temps assez court, l'aiguille arrive sensiblement au repos, dans sa position d'équilibre (*). — Or, nous verrons (867) que tout déplacement d'un aimant, par rapport à un circuit conducteur voisin, fait naître dans ce circuit un *courant induit*, dont le sens est tel que, en réagissant sur l'aimant, il contrarie son mouvement. On comprend dès lors que, dans un galvanomètre quelconque, les courants induits qui, à chaque oscillation de l'aimant, prennent naissance dans le fil même du multiplicateur, doivent produire un amortissement des oscillations. Pour que les amplitudes des oscillations décroissent rapidement, il faut, d'une part, faire en sorte que les courants induits soient aussi intenses que possible; d'autre part, donner au système mobile une faible masse et de petites dimensions. — D'après ces indications on a pu, non seulement réaliser des appareils comme le galvanomètre de W. Thompson, dans lesquels les oscillations s'amortissent très rapidement, mais même construire des galvanomètres *apériodiques*, dans lesquels les oscillations sont complètement supprimées.

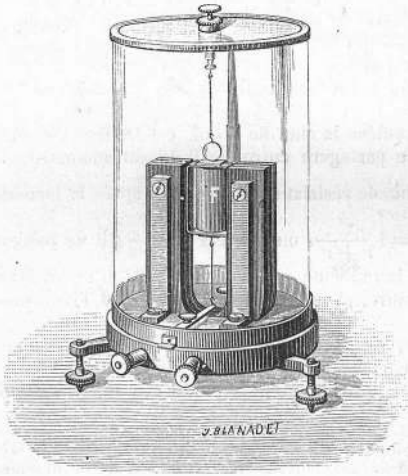


Fig. 590. — Galvanomètre apériodique. de MM. Deprez et d'Arsonval.

La figure 590 représente un *galvanomètre apériodique*, de MM. Deprez et d'Arsonval. — Dans ce galvanomètre, c'est le cadre fonctionnant comme multiplicateur qui est mobile, autour d'un axe formé par deux fils métalliques, tendus verticalement dans le prolongement l'un de l'autre : ce sont ces fils eux-mêmes qui servent à la transmission du courant. — Le cadre est placé entre les branches d'un aimant

(*) La résistance de l'air, qui contrarie le mouvement des pièces mobiles, produit un amortissement sensible, mais insuffisant dans la plupart des cas.

fixe en fer à cheval : à son intérieur, est un cylindre creux de fer doux F, indépendant de lui, et fixé par un support qui est masqué sur la figure.

L'appareil est réglé de façon que, lorsqu'il n'est pas en expérience, la tension du fil métallique place le plan du cadre parallélement à la ligne menée d'un pôle à l'autre de l'aimant fixe. — Lorsqu'on y fait passer un courant, le cadre est dévié, dans un sens ou dans l'autre, selon le sens du courant, et tend à se mettre en croix avec les lignes de force du champ; mais, à mesure que la déviation augmente, la torsion éprouvée par le fil arrive à faire équilibre aux actions électromagnétiques. L'intensité du courant est sensiblement proportionnelle à la déviation. — On mesure l'angle de déviation par la méthode optique (478), au moyen d'un petit miroir fixé au cadre.

La propriété caractéristique de ce galvanomètre est de prendre immédiatement sa position d'équilibre : en effet, d'une part, en raison de la puissance de l'aimant fixe et du cylindre F aimanté par influence, les courants d'induction qui naissent dans le cadre pendant son mouvement, et qui tendent à s'opposer au mouvement, sont très intenses; d'autre part, la masse du cadre mobile est très faible, en sorte que l'amortissement est instantané.

827. Galvanomètres industriels : ampèremètres, voltmètres. — Pour les mesures industrielles, on fait usage de galvanomètres comme celui que représente la figure 591. — A l'intérieur d'une boîte cylindrique, est un petit barreau de fer doux *ab* (*fig.* 592), mobile autour d'un axe formé par une tige rigide dont une extrémité s'appuie sur le fond de la boîte, l'autre extrémité étant maintenue par un bouton extérieur (*fig* 591). Quand l'appareil n'est pas en expérience, le barreau *ab* s'oriente dans le champ magnétique que produisent deux aimants fixes, AB, A'B' ; une aiguille légère, fixée à l'axe de rotation du barreau, s'arrête alors au zéro de la graduation. Le multiplicateur est formé par deux bobines fixes, C, D, que l'on intercale, au moyen des bornes P et N, dans le circuit du courant soumis à l'expérience. — La déviation imprimée au barreau *ab*, et par suite à l'aiguille, est à peu près proportionnelle à l'intensité du courant.

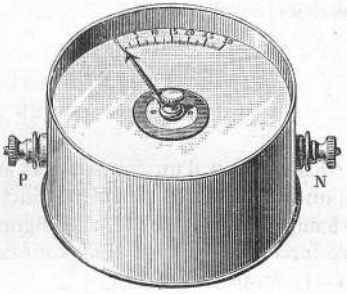


Fig. 591. — Ampèremètre.

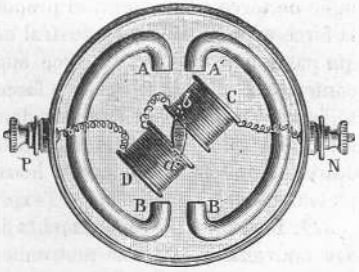


Fig. 592.

Dans ceux de ces instruments qui sont destinés à servir d'*ampèremètres*, les bobines sont à *très gros fil*; leur résistance est assez faible pour

que l'intercalation de l'instrument dans les circuits auxquels on l'applique ne modifie pas sensiblement l'intensité du courant. — Le cadran est gradué *en ampères*.

Les *voltmètres* offrent le même aspect extérieur que les ampèremètres ; mais les bobines sont *à fil très fin et très long* ; la résistance r, qui peut atteindre environ 2000 ohms, est toujours extrêmement grande par rapport à la résistance intérieure de la pile, ou du producteur d'électricité, dont on se propose d'évaluer la *force électromotrice* E à un instant donné. — Si, pendant un intervalle de temps très court, on relie les deux pôles de la pile aux deux bornes P et N, la différence de potentiel aux deux bornes prend une valeur v, un peu inférieure à E, mais qui en diffère d'autant moins que r est plus grand par rapport à la résistance intérieure de la pile. L'intensité du courant qui passe dans les bobines étant égale à $\frac{v}{r}$ (793), est proportionnelle à v, c'est-à-dire à E. La déviation de l'aiguille est donc proportionnelle à la force électromotrice de la pile. – Le cadran est gradué en *volts*.

III. — ACTIONS DES COURANTS SUR LES AIMANTS ET ACTIONS RÉCIPROQUES.

828. Action d'un courant fixe sur un aimant mobile. — Le passage d'un courant dans un fil conducteur donne toujours naissance à un champ magnétique (814) : les figures 577 et 580 représentent les lignes de force, dans le cas d'un courant rectiligne indéfini, et dans le cas d'un courant circulaire.

Lorsqu'un aimant *mobile* est placé dans le champ magnétique que produit un courant passant dans un *conducteur fixe*, chacun des pôles de l'aimant est sollicité par une force dirigée suivant la tangente à la ligne de force en ce point, et proportionnelle à l'intensité magnétique ; la force appliquée au pôle austral est dans le sens de la ligne de force qui passe par ce pôle ; la force appliquée au pôle boréal est de sens contraire à celui de la ligne de force. — Selon que les pôles de l'aimant, sollicités chacun à se mouvoir dans une direction déterminée, pourront obéir plus ou moins librement à ces actions, il pourra se produire tels ou tels mouvements. Nous allons en donner quelques exemples, dans des conditions que l'expérience permet de réaliser.

829. Exemples de mouvements divers, imprimés à des aimants par des courants. — 1° Le mouvement d'*orientation* d'un aimant sous l'action d'un courant est réalisé dans l'expérience d'Œrsted (789). Quand le fil conducteur est placé horizontalement dans le méridien magnétique, au-dessus de l'aiguille aimantée (*fig.* 563), dès que le courant passe, les deux pôles de l'aiguille sont sollicités par deux forces

égales et contraires, constituant un couple, qui a pour effet de donner à l'aiguille une orientation telle que son pôle austral se porte à la gauche du courant.

2° Voici une disposition, due à Boisgiraud, dans laquelle l'action d'un courant communique à un aimant un mouvement de *translation*. — Une aiguille aimantée très légère AB (*fig.* 593) est placée sur un flotteur, à la surface de l'eau; sous l'influence de la Terre, elle s'oriente dans le plan du méridien magnétique, que nous supposerons être le plan de la figure. Perpendiculairement au méridien magnétique, on dispose un long fil de cuivre rectiligne, dont C représente la section, et dont les deux extrémités sont mises en communication avec les pôles d'une pile : l'aiguille prend un mouvement de translation suivant sa propre direction, mouvement dont le sens dépend du sens du courant et de la position du fil par rapport aux deux pôles magnétiques (*).

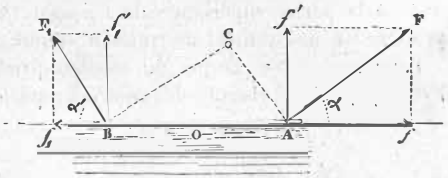


Fig. 593. — Expérience de Boisgiraud.

3° Faraday est parvenu à produire la *rotation continue* d'un aimant sous l'influence d'un courant, de la manière suivante. — On place verticalement, au milieu du mercure que contient une éprouvette de verre (*fig.* 594), un barreau aimanté *a*, lesté par un petit cylindre de platine *p*; un anneau métallique K met le mercure en communication, par le contour de sa surface, avec le pôle négatif d'une pile; le centre de cette même surface est mis en communication avec le pôle positif, au moyen

(*) Pour nous rendre compte de ce résultat, supposons que le courant soit dirigé, dans le fil C, *d'arrière en avant* du plan de la figure, et que ce fil soit placé *au-dessus de la moitié australe* OA de l'aiguille. Le pôle A sera sollicité par une force F, située dans le plan de la figure, perpendiculaire à CA, et dirigée à gauche du courant (789); de même, le pôle B sera sollicité par une force F_1, située dans le même plan, perpendiculaire à CB et dirigée à droite du courant (puisque B est un pôle boréal). La force F peut se décomposer en deux autres, l'une f égale à F cos α et dirigée suivant le prolongement de BA, l'autre f' verticale; de même, F_1 peut se décomposer en une force f_1 égale à F_1 cos α' et dirigée suivant le prolongement de AB, et une force verticale f'_1. Les deux forces verticales f' et f'_1 sont trop faibles pour soulever l'aiguille; les deux forces horizontales f et f_1 tendent à entraîner l'aiguille, l'une dans la direction BA, l'autre en sens contraire. Or, les intensités des forces F et F_1 étant inversement proportionnelles aux distances CA et CB, on a $F > F_1$; d'ailleurs l'angle α est plus petit que α', et l'on a $\cos\alpha > \cos\alpha'$; donc F cos α ou f est plus grand que $F_1 \cos\alpha'$ ou f_1; la résultante des deux forces f et f_1 est donc dirigée dans le sens BA. L'aiguille doit donc, dans ce cas, prendre un mouvement de translation suivant BA, c'est-à-dire dirigé du sud au nord, dans le plan du méridien magnétique. — Lorsque, par suite de ce mouvement, le milieu O arrive dans le plan vertical passant par la direction du courant, l'aiguille est animée d'une certaine vitesse qui lui fait dépasser cette position; mais, la force f_1 devenant alors supérieure à f, la vitesse diminue, puis change de sens. L'aiguille oscille donc de part et d'autre de cette position d'équilibre stable, où elle finit par se fixer.

de la tige métallique T. Au moment où l'on ferme le circuit, on voit l'aimant se rapprocher de la tige T et prendre autour d'elle un mouvement continu de rotation, dans le sens des aiguilles d'une montre. — Ampère a modifié l'expérience de Faraday, en faisant plonger le conducteur T dans une petite capsule métallique, contenant du mercure et fixée à la partie supérieure de l'aimant (*fig.* 595). On voit l'aimant prendre un mouvement de rotation autour de son axe.

Pour se rendre compte du résultat produit, dans l'expérience de Faraday (*fig.* 594), il suffit de remarquer que les lignes de force du champ

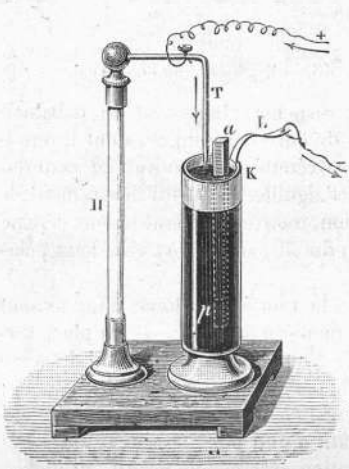


Fig. 594. — Rotation continue d'un aimant sous l'action d'un courant.

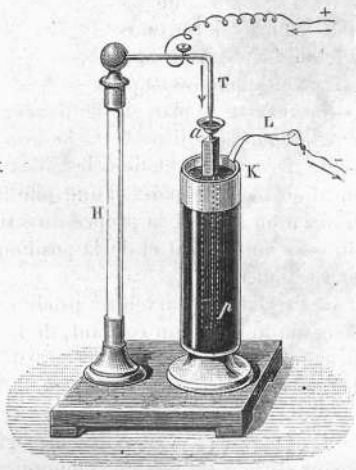


Fig. 595. — Rotation d'un aimant autour de son axe.

magnétique créé par le courant fermé TKL, dans la région de l'espace où peut se déplacer l'extrémité supérieure du barreau, ont à peu près la forme de circonférences horizontales (816), ayant leur centre sur l'axe du conducteur T ; elles traversent l'intérieur du circuit en allant de la droite à la gauche du courant fermé (ici d'arrière en avant de la figure, dans le sens des aiguilles d'une montre) ; c'est dans ce sens que le pôle austral *a* doit décrire la ligne de force (*).

Le sens de la rotation est interverti, lorsque l'on renverse le courant, ou lorsque l'on retourne le barreau mobile bout pour bout.

(*) Dans l'expérience d'Ampère, il semble que le pôle austral *a* ne doive pas se déplacer, puisqu'il est situé sur l'axe du barreau, au centre des lignes de force. Mais, en réalité, il existe, à l'extrémité supérieure du barreau aimanté (*fig.* 595), une couche superficielle de magnétisme austral, chaque masse magnétique élémentaire étant la terminaison d'un filet magnétique (722). Chacune de ces petites masses doit se déplacer dans le sens des lignes de force.

D'une manière générale, un pôle austral doit être sollicité à traverser l'intérieur du courant fermé, dans le sens des lignes de force, en entrant par la droite et sortant par la gauche ; un pôle boréal doit traverser le courant en sens contraire. — Il en résulte que les deux pôles d'un aimant mobile ne peuvent jamais traverser l'un et l'autre un même courant fermé, d'un mouvement de rotation continue.

830. Action exercée par un champ magnétique sur un élément de courant mobile. — Dans tous les cas, comme ceux qui précèdent, où un *aimant mobile* est placé dans le champ magnétique d'un *courant fixe*, le mouvement est déterminé par l'ensemble des actions exercées, par chacun des éléments du courant, sur chacun des pôles de l'aimant. — On a vu que l'action d'un élément MN de courant (*fig.* 578), sur un pôle magnétique A, est une force f, perpendiculaire au plan AMN, dirigée suivant la règle d'Ampère, et dont l'intensité est donnée par la formule de Laplace (815).

Inversement, sous l'action d'un pôle A, supposé *fixe*, l'élément de courant MN (*fig.* 596), supposé *mobile*, est sollicité par une force f', égale à f, mais de sens contraire, c'est-à-dire dirigée *vers la droite de l'élément de courant* (*).

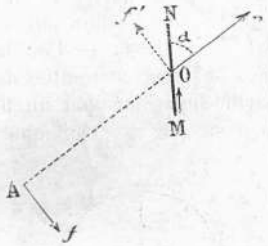


Fig. 596.

L'expression de la force f' est encore donnée par la formule de Laplace, $f' = \frac{m}{r^2} i\varepsilon \sin \alpha$; mais il est avantageux de mettre ici cette expression sous une forme un peu différente. On voit, en effet, que $\frac{m}{r^2}$ représente la *force magnétique* au point O (force exercée sur l'unité de magnétisme austral, supposée placée en O, par la masse m placée en A, à la distance r) ; en désignant cette force par F, il vient :

$$f' = F i\varepsilon \sin \alpha.$$

Sous cette forme, la formule de Laplace exprime encore l'action exercée *par un champ magnétique quelconque*, sur un élément de cou-

(*) En réalité, *l'action* f de l'élément de courant sur le pôle A, et la *réaction* f' du pôle sur l'élément de courant, devant être deux forces égales et directement opposées (note de la page 5), on doit considérer la force f comme appliquée, soit en O, soit en un point *quelconque* du prolongement de la droite Of', pourvu que l'on suppose ce point invariablement lié au point A. Or, on démontre que la résultante de toutes les forces f exercées sur le pôle A, par tous les éléments d'un courant fermé, passe toujours par le point A. Dès lors, quand on veut se rendre compte de l'action électromagnétique exercée par un courant fermé sur un pôle austral placé en un point A, on ne change rien au résultat en supposant, comme nous l'avons fait (815), que chacune des forces élémentaires passe par ce point.

rant MN placé en un point O du champ. C'est une force Of (*fig.* 596) appliquée au milieu O de l'élément, dirigée perpendiculairement au plan MNF qui contient l'élément du courant et la force magnétique F du champ au point O; elle est dirigée *vers la droite de l'élément de courant*, en supposant que l'observateur, couché dans l'élément de courant, ait son visage tourné du côté où vient la force magnétique.

Étant donné un *conducteur mobile* parcouru par un courant, et placé dans le champ magnétique produit par un *aimant fixe*, on conçoit que l'on puisse, à l'aide de la formule précédente, calculer l'action du champ produit par l'aimant, sur chaque élément de la partie mobile du courant; chacune de ces actions élémentaires est d'ailleurs dirigée à droite de l'élément de courant. — La résultante de toutes ces actions élémentaires imprimera au conducteur mobile un mouvement de telle ou telle nature, suivant les liaisons auxquelles il sera assujetti.

Nous allons en donner quelques exemples.

831. Exemples de mouvements divers, imprimés à des courants par des aimants. — 1° On obtient l'*orientation* d'un courant mobile, sous l'influence d'un aimant, au moyen des piles flottantes imaginées par de la Rive. — Une lame de zinc Z et une lame de cuivre C (*fig.* 597) sont assujetties dans une rondelle de liège, et réunies à leur partie supérieure par un fil métallique rigide L; si l'on fait flotter le liège sur un vase contenant de l'eau acidulée, il se produit un courant dans le circuit formé par le zinc Z, l'eau acidulée, le cuivre C et le fil L. — Ce courant circulaire mobile doit s'orienter, sous la seule action du *champ magnétique terrestre*, comme le ferait un aimant qui aurait sa ligne des pôles dirigée perpendiculairement au plan du courant : cela résulte de l'analogie que présentent les lignes de force d'un courant circulaire (*fig.* 580) avec celles d'une lame aimantée, couverte de magnétisme austral sur la face correspondante à la gauche du courant circulaire fermé (817, *Rem*). L'appareil, abandonné à lui-même, tend à se mettre en équilibre perpendiculairement au méridien magnétique, la gauche du courant fermé se tournant vers le nord. — Cette expérience se réalise d'ailleurs plus facilement avec un autre dispositif, qui sera indiqué plus loin (*fig.* 602).

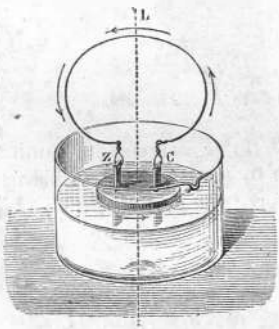


Fig. 597. — Pile flottante.

Si maintenant on place horizontalement un barreau aimanté au-dessus de la partie supérieure L, dans le plan du fil CLZ, on voit l'équipage se mettre en croix avec l'aimant. Le pôle austral d'un aimant mobile se placerait du côté du pôle boréal de l'aimant fixe (*fig.* 504):

c'est donc du côté de ce pôle boréal que doit toujours se placer la face qui correspond à la *gauche du courant fermé.*

2° Le même appareil (*fig.* 597) peut servir à obtenir un mouvement de *translation* d'un courant, sous l'influence d'un aimant. — Il suffit, pour cela, de placer le pôle du barreau aimanté un peu en avant du circuit CLZ, et à la hauteur de son centre, l'axe du barreau étant perpendiculaire au plan du courant. — Si c'est le pôle austral qu'on présente, l'expérience montre qu'il y a *répulsion.* Tout se passe, en effet, comme si l'on présentait le pôle austral du barreau au pôle austral d'un aimant mobile, puisque la gauche du courant fermé CLZ est en avant de la figure. — En présentant le pôle boréal de l'aimant, on observera une *attraction.*

3° L'action d'un aimant fixe peut aussi produire la *rotation continue* d'une portion de courant mobile. C'est ce que montre l'expérience suivante, inverse, quant au résultat, de celle que nous avons décrite plus haut (829, 3°). — Une cuvette de zinc DD (*fig.* 598), contenant de l'eau aiguisée d'acide sulfurique, porte en son centre une colonne métallique H ; sur la coupelle *o* qui termine cette colonne, repose, par une pointe qui plonge dans du mercure, un équipage formé de deux fils métalliques verticaux *b* et *c*, et d'un cercle de cuivre horizontal plongé dans l'eau de la cuvette : l'équipage tout entier est ainsi rendu mobile autour d'un axe vertical passant par la pointe *i*. Il se développe un courant, dans le circuit formé par le zinc de la cuvette, le liquide acide, le cercle de cuivre, les fils verticaux et la colonne H; ce courant marche dans le sens des flèches de la figure. Si l'on place le pôle d'un aimant K au-dessous de la colonne métallique H, l'équipage prend un mouvement de rotation continu autour de son axe. — Si c'est le pôle austral de l'aimant qui a été présenté, on remarquera que, pour chaque élément rectiligne du courant ascendant *c*, la droite du courant est *en avant* de la figure, et que, pour chaque élément du courant *b*, la droite du courant est *en arrière* de la figure, quand on a égard aux lignes de force qui divergent du pôle austral, de bas en haut, à droite et à gauche. Les

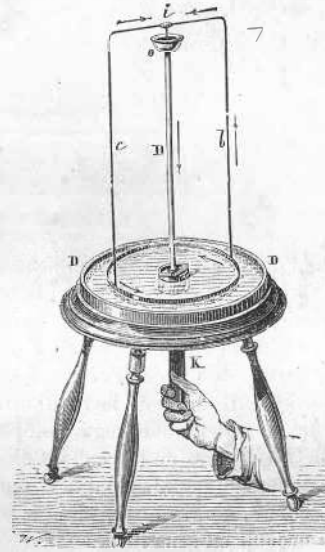


Fig. 598.
Rotation continue d'un courant sous l'action d'un aimant.

actions électromagnétiques, appliquées à chacun des éléments de *c* et de *b*, doivent donc déterminer un mouvement de rotation dans le sens indiqué par les flèches : c'est ce que l'expérience vérifie. — Quant à la continuité du mouvement, on peut s'en rendre compte en remarquant que les courants verticaux conservent, quelle que soit leur position absolue, la même position par rapport à l'aimant.

4° On produit encore la *rotation continue* d'une portion de courant mobile, dans l'expérience de la *roue de Barlow* (*fig.* 599). — Une roue de cuivre dentée est mobile autour d'un axe métallique C, qui communique par le fil N avec le pôle négatif d'une pile; une ou plusieurs dents de la roue plongent dans une auge DF, contenant du mercure,

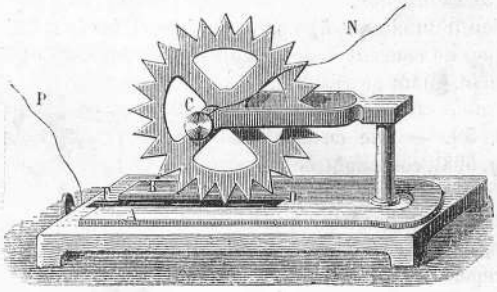


Fig. 599. — Roue de Barlow.

que l'on mettra en communication avec le pôle positif de la pile, par le fil P : dans ces conditions, le courant sera ascendant dans la partie inférieure de la roue. — Au moment où l'on ferme le circuit, l'action d'un aimant en fer à cheval, dont les deux branches sont fixées de part et d'autre de l'auge DF, imprime à la roue un mouvement de rotation continue. Le sens de la rotation est celui des aiguilles d'une montre, pour un observateur regardant l'appareil du côté du pôle austral A. En effet, les lignes de force étant dirigées de A en B, un observateur placé dans le courant ascendant, et regardant le pôle A, aurait sa droite du côté de F. — Si l'on renverse le sens du courant, la rotation de la roue se produit en sens inverse (*).

Cet appareil peut être considéré comme constituant un moteur

(*) Dans toutes les expériences où l'on veut pouvoir, à volonté, établir le courant dans un circuit, supprimer le courant, ou renverser le sens du courant, il est commode de faire usage d'un *commutateur*, comme celui que représentent les figures 600 et 601.

La pièce C est un cylindre d'ivoire, qu'on peut faire tourner autour d'un axe horizontal au moyen du bouton B. Sur ce cylindre sont appliquées deux plaques de cuivre P' et P'', amincies vers leurs bords, et laissant à découvert (*fig.* 601), à droite et à gauche, une partie du cylindre C. — La plaque P' est en communication, par la vis *b* (*fig.* 600), avec le demi-axe métallique *d'* et la borne métallique AA'; la plaque P'' est en communication, par la vis *a*, avec le demi-axe *d* et la borne A. — Deux autres bornes,

électro-magnétique. Supposons en effet que l'on suspende un corps pesant à l'extrémité d'un fil fixé en un point de l'axe C : lorsqu'on fera passer un courant suffisamment intense, le mouvement de rotation de la roue aura pour effet d'enrouler le fil sur l'axe, en soulevant le poids qui y est suspendu. — Une partie de l'énergie dépensée sous forme de courant se retrouvera dans le travail mécanique produit par le moteur électromagnétique.

placées de part et d'autre du commutateur (*fig.* 601), communiquent avec les ressorts métalliques R et R'.

Mettons le pôle positif de la pile en communication avec R, et le pôle négatif avec R' ; les bornes A et A' sont en communication avec le conducteur dans lequel devra passer le courant. — Quand le commutateur sera dans la position de la figure 601, le

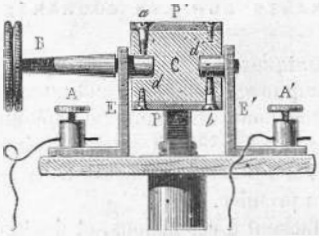


Fig. 600. — Commutateur.

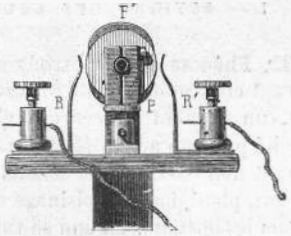


Fig. 601.

courant ne passera pas. — Si l'on fait tourner le commutateur de 90° vers la droite, la plaque P viendra en contact avec le ressort R ; la plaque P', avec le ressort R', et le courant passera dans le conducteur, de A' vers A. — Si on renverse le commutateur, de 180°, les contacts des deux plaques avec les ressorts seront intervertis, et le courant passera de A en A' dans le conducteur.

CHAPITRE VI

ÉLECTRO-DYNAMIQUE

I. — ACTIONS DES COURANTS SUR LES COURANTS

832. Phénomènes électrodynamiques. — Puisque, d'une part, un courant crée autour de lui un champ magnétique (814), et que, d'autre part, un élément de courant placé dans un champ magnétique est sollicité par une action électromagnétique (830), il est à prévoir qu'un courant doit exercer des actions sur les divers éléments d'un second courant, placé dans le voisinage du premier.

Tous les phénomènes qui se rattachent à ces actions, et dont l'étude constitue l'*électrodynamique*, peuvent s'interpréter au moyen de trois principes fondamentaux, qui ont été énoncés par Ampère, savoir : 1° le principe des *courants parallèles*; 2° le principe des *courants angulaires*; 3° le principe des *courants sinueux*.

833. Principe des courants parallèles. — *Deux courants parallèles et de même sens s'attirent; deux courants parallèles et de sens contraires se repoussent.* — Pour vérifier ce principe, l'une des dispositions les plus simples est la suivante, qui a été imaginée par Ampère.

Un fil métallique *adefg* (*fig.* 602), replié comme l'indique la figure, est terminé à ses deux extrémités *a* et *b* par des pointes d'acier, qu'on plonge dans des godets pleins de mercure. Ces godets communiquent, l'un *a*, avec une colonne métallique creuse H, dans laquelle on peut amener un courant, au moyen d'un fil plongeant dans le godet M; l'autre *b*, avec une tige métallique H′, située à l'intérieur de H, isolée dans un tube de verre, et par laquelle le courant, après avoir parcouru l'équipage mobile, revient au godet N et à la pile. Le conducteur *defg* peut ainsi, sans cesser d'être parcouru par le courant, tourner autour d'un axe vertical passant par *a* et *b*.

Pour avoir une autre portion de courant *fixe*, dont nous puissions étudier l'action sur les diverses parties du conducteur mobile, nous intercalerons, dans le circuit de la pile, un fil métallique couvert de soie, et enroulé un certain nombre de fois sur un cadre de bois rectangulaire MNPQ (*fig.* 603).

Si, tenant à la main le cadre MNPQ, on approche le côté vertical MN du côté vertical *fg*, on observe *une attraction* : or, les portions du fil

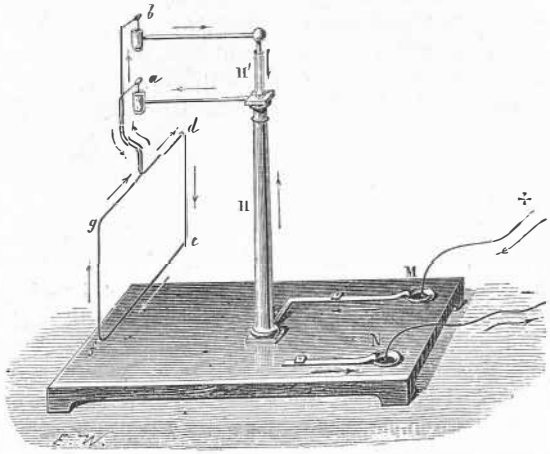


Fig. 602. — Appareil d'Ampère, pour l'étude des actions exercées sur un courant mobile

qui couvrent le côté MN du cadre sont parallèles à *fg* (*fig.* 604), et le courant s'y propage dans le même sens que dans *fg*. — Donc *deux courants parallèles et de même sens s'attirent.*

Au contraire, si l'on approche ce même côté MN du côté *de* du fil mobile, il se produit *une répulsion* : or, les portions du fil qui sont appliquées sur MN sont encore parallèles à *de* (*fig.* 605), mais elles sont parcourues par le courant en sens contraire. — Donc *deux courants parallèles et de sens contraires se repoussent.*

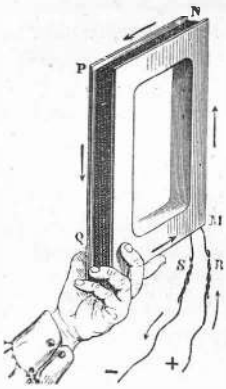


Fig. 603.
Courant fixe.

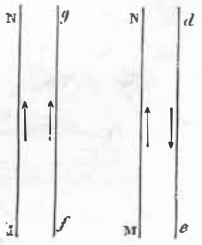


Fig. 604. Fig. 605.
Actions des courants parallèles.

834. Principe des courants non parallèles, ou courants angulaires. — *Deux courants non parallèles s'attirent, quand ils s'approchent ou s'éloignent ensemble de leur point de croisement; ils se repoussent, quand l'un s'en approche tandis que l'autre s'en éloigne.*

Reprenons le cadre MNPQ (*fig.* 605), et plaçons le côté PN au-dessous de *fe* (*fig.* 602), de manière qu'il fasse avec lui un certain angle. Les courants se propageant dans le sens indiqué par les flèches de la figure 606, on voit le côté mobile *ef* tourner sur lui-même, et ses deux moitiés O*e*, O*f*, se porter respectivement vers ON et OP. Donc il y a attraction entre les deux côtés qui forment l'angle *e*ON, et dans lesquels les deux courants s'approchent du sommet de l'angle; il y a aussi

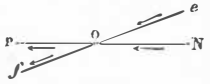


Fig. 606.

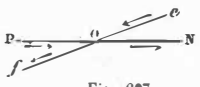


Fig. 607.

Actions des courants angulaires.

attraction entre les côtés qui forment l'angle PO*f*, et dans lesquels les deux courants s'éloignent du sommet de l'angle. — Donc *deux courants angulaires s'attirent, quand ils s'approchent ou s'éloignent ensemble de leur point de croisement.*

Au contraire, si l'on intervertit le sens du courant dans l'un des conducteurs, par exemple dans les fils qui ont la direction NP, de telle sorte que le courant prenne la direction PN (*fig.* 607), on voit les deux moitiés O*e* et O*f* s'éloigner respectivement de ON et OP, pour se porter vers OP et ON. Donc il y a répulsion entre les deux côtés de l'angle *e*ON, dans lesquels l'un des courants s'approche du sommet de l'angle tandis que l'autre s'en éloigne; il en est de même pour les côtés de l'angle PO*f*. — Donc *deux courants angulaires se repoussent, quand l'un s'approche du point de croisement tandis que l'autre s'en éloigne* (*).

(*) Puisque deux courants angulaires tels que *e*O, OP (*fig.* 606), faisant un angle obtus, se repoussent, on peut se demander si la répulsion n'aura pas encore lieu quand l'angle des deux courants sera égal à 180°; s'il en est ainsi, *deux portions consécutives d'un même courant doivent se repousser.*

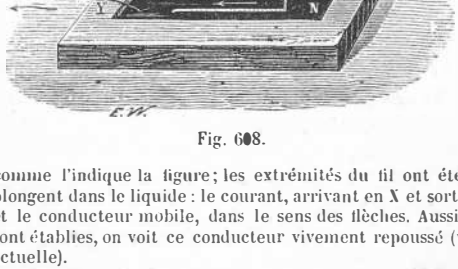


Fig. 608.

Deux rigoles parallèles M et N (*fig.* 608) sont ménagées dans une petite auge de bois et contiennent du mercure; à la surface du liquide, dans les rigoles, sont placées les deux branches d'un fil métallique couvert de soie, et replié comme l'indique la figure; les extrémités du fil ont été mises à nu, recourbées, et plongent dans le liquide : le courant, arrivant en X et sortant en Y, traverse le mercure et le conducteur mobile, dans le sens des flèches. Aussitôt que les communications sont établies, on voit ce conducteur vivement repoussé (vers la droite, dans la figure actuelle).

Il faut cependant remarquer que, dans cette expérience, la répulsion peut s'expliquer par l'action des courants rectilignes X et Y, sur le courant qui passe dans la portion repliée du conducteur mobile.

Remarque. — Ce principe s'applique encore à deux courants non situés dans un même plan, comme *ab* et *cd* dans la figure 609, et c'est même toujours dans ces conditions que l'on réalise l'expérience. Au lieu du *point de croisement*, il faut alors considérer la *perpendiculaire commune pp'* à la direction des deux conducteurs. Il y a attraction entre les parties où les courants s'approchent ou s'éloignent ensemble de la perpendiculaire commune, et répulsion entre les parties où l'un des courants s'approche, tandis que l'autre s'éloigne de cette perpendiculaire.

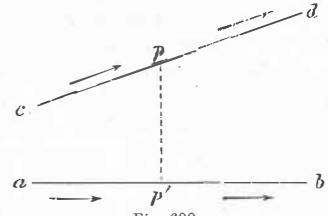


Fig. 609.

835. Principe des courants sinueux. — *Un courant sinueux a la même action qu'un courant rectiligne de même intensité et terminé aux mêmes extrémités, pourvu que la distance à laquelle s'exerce cette action soit très grande par rapport à l'amplitude des sinuosités.*

Pour vérifier ce principe, on prend un fil de cuivre *ihl* (*fig.* 610), dont l'une des branches *ih* est rectiligne, l'autre *hl* sinueuse, et dont les extrémités communiquent avec les pôles de la pile ; si le principe précédent est exact, l'action du système de ces deux fils sur un conducteur quelconque doit être nulle, puisque l'action de *hl* doit être équivalente à celle d'un courant rectiligne de même longueur et de même intensité que *ih*, mais de sens contraire. On constate, en effet, en approchant le système *ihl* de l'un quelconque des côtés du courant mobile de la figure 602, qu'il n'imprime aucun mouvement à ce courant, pouvu que la distance qui l'en sépare soit suffisamment grande par rapport à l'amplitude des sinuosités.

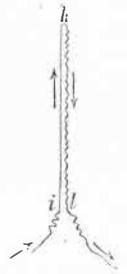


Fig. 610.
Courant sinueux.

836. Action du champ magnétique terrestre sur des courants mobiles. — Conducteurs astatiques. — Dans toutes les expériences qu'on réalise au moyens de conducteurs plus ou moins mobiles, parcourus par des courants, ces conducteurs sont nécessairement soumis à l'action du champ magnétique terrestre, dont l'existence est rendue manifeste par l'action de la Terre sur l'aiguille aimantée (730). — Ainsi, par exemple, le courant fermé *defg* (*fig.* 602), abandonné à lui-même, doit se comporter comme une lame aimantée mobile autour d'un axe vertical, qui posséderait une couche de magnétisme austral sur celle de ses faces qui correspond à la gauche du courant fermé, et une couche de magnétisme boréal sur l'autre face (817, *Rem.*). Or, la face australe d'une pareille lame aimantée se tournerait vers le nord.

De même le courant *defg* doit se mettre en équilibre dans un plan perpendiculaire au méridien magnétique ; la face qui est à la gauche du courant fermé doit se porter vers le nord, ce qui revient à dire que le courant ascendant *fg* doit se porter vers l'ouest. C'est, en effet, ce que l'expérience vérifie.

Dès lors, si, dans une expérience quelconque, on se propose d'étudier l'action exercée sur un courant mobile, soit par un aimant, soit par un autre courant, il pourrait se faire que les effets produits par l'action de la Terre vinssent masquer ceux dont il s'agit. — C'est pourquoi on construit des conducteurs dont la disposition est telle, que les actions de la Terre sur leurs diverses parties se neutralisent : ces conducteurs prennent le nom de *conducteurs astatiques*.

Les figures 611 et 612 représentent deux conducteurs de cette

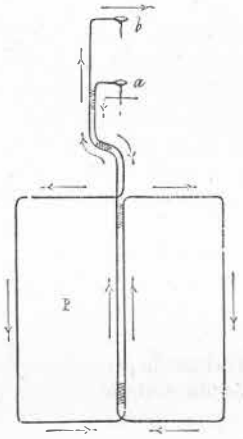


Fig. 611.

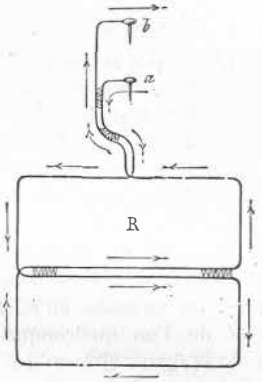


Fig. 612.

Conducteurs astatiques.

espèce. — Quand on fait passer un courant dans le conducteur de la figure 611, la partie fermée de ce conducteur se compose de deux circuits rectangulaires, placés symétriquement par rapport à l'axe autour duquel le conducteur est mobile ; mais il est aisé de voir que la gauche du courant, pour l'un de ces deux circuits fermés, correspond à la droite du courant pour l'autre ; il en résulte que le conducteur équivaut à un système astatique de deux aiguilles aimantées. — Les mêmes remarques sont applicables au conducteur de la figure 612.

C'est le conducteur de la figure 611 qui devra être employé, préférablement à celui de la figure 602, pour vérifier le principe des courants parallèles (833), sans avoir à tenir compte de l'action de la Terre. — Le conducteur de la figure 612 servira pour vérifier le principe des courants angulaires (834).

837. Phénomènes électro-dynamiques en général. — Ampère, et d'autres physiciens après lui, ont appliqué les trois principes dont nous venons de donner une vérification expérimentale, à l'interprétation de diverses expériences, dans lesquelles une portion mobile d'un conducteur parcouru par un courant était soumise à l'action d'un courant fixe : on obtenait, selon les cas, tel ou tel mouvement, d'orientation, de rotation, etc. — Ces expériences, et leur interprétation au moyen des principes posés par Ampère, ont perdu beaucoup de leur valeur. Il est plus simple, et plus général, de rattacher les phénomènes de l'Électrodynamique à ceux de l'Électromagnétisme, par la considération des *champs magnétiques* créés par les courants. — Nous n'y insisterons pas davantage.

II. — SOLÉNOÏDES. — THÉORIE DU MAGNÉTISME, D'AMPÈRE.

838. Solénoïdes. — On appelle *solénoïde*, un système de courants circulaires égaux, de même sens, et dont les plans sont perpendiculaires à la ligne qui passe par leurs centres.

Pour réaliser un solénoïde, on prend un fil de cuivre entouré de soie, et on le contourne sur lui-même comme l'indique la figure 613. Si un courant pénètre par l'extrémité *a* et sort par l'extrémité *b*, il parcourt dans le même sens toutes les portions circulaires du fil ; quant aux portions rectilignes, leur ensemble constitue deux courants rectilignes, de même longueur totale et de sens contraires, dont les actions se neutralisent : le système se comporte donc comme s'il se réduisait aux courants *circulaires*.

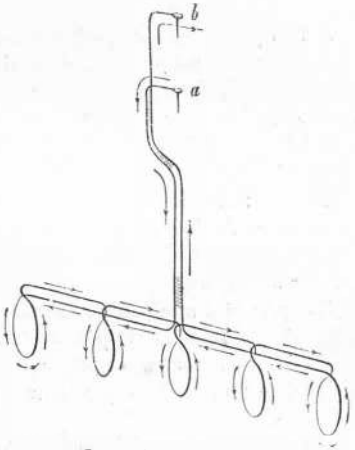


Fig. 613. — Solénoïde.

Les lignes de force du champ créé par ce système de courants circulaires (*fig.* 581) présentent une analogie remarquable avec celles que produirait un aimant cylindrique, ayant les mêmes dimensions que le solénoïde. — Nous allons montrer, en effet, par un certain nombre d'expériences, que les solénoïdes jouissent de toutes les propriétés des aimants.

839. Les solénoïdes jouissent de toutes les propriétés des aimants. — Suspendons le solénoïde de la figure 613 au support représenté par

la figure 602 : il est alors mobile autour de la verticale passant par les pointes *a* et *b*. Or on sait que le plan de chaque cercle tend à s'orienter, sous l'action de la Terre, perpendiculairement au méridien magnétique : le solénoïde doit donc s'orienter de manière que son *axe*, c'est-à-dire la droite qui passe par les centres de tous les cercles, se place *comme une aiguille aimantée*, dans le plan du méridien magnétique. C'est ce que vérifie l'expérience. — Par analogie avec les aimants, on doit appeler *pôle austral* du solénoïde, l'extrémité qui se tourne vers le nord; *pôle boréal*, l'extrémité qui se tourne vers le sud. — D'ailleurs, les pôles du solénoïde sont définis par le sens même du courant. Le pôle austral est l'extrémité qui est à la gauche de chacun des courants circulaires.

Si l'on soumet le même solénoïde mobile à l'action d'un courant rectiligne fixe, on constate qu'il se comporte encore *comme un aimant* : il tend à se mettre en croix avec le courant, son pôle austral se portant à gauche. — C'est ce qu'on peut encore s'expliquer, en remarquant que le plan de chacun des courants circulaires tend à se placer parallèlement au courant rectiligne. — Dans ce cas, d'ailleurs, le solénoïde, soumis toujours à l'action de la Terre qui tend à ramener son axe dans le méridien magnétique, prend, comme le ferait un aimant, une position intermédiaire entre la direction du méridien magnétique et la direction perpendiculaire au courant fixe.

Si l'on présente, à ce solénoïde, un autre solénoïde tenu à la main, on constatera, comme pour deux aimants, que *deux pôles de même nom se repoussent; deux pôles de noms contraires s'attirent*. — Ce résultat peut s'expliquer au moyen des actions des courants sur les courants; en effet, quand les deux pôles de même nom sont en regard, leurs éléments correspondants sont parallèles, et les courants sont de sens contraires : il doit donc y avoir *répulsion* (833). — Quand deux pôles de noms contraires sont en regard, leurs éléments correspondants sont encore parallèles, mais les courants sont de même sens : il doit donc y avoir *attraction*.

En opérant d'une manière semblable, on constate que le pôle austral *d'un aimant* repousse le pôle austral *d'un solénoïde*; que le pôle boréal d'un aimant repousse le pôle boréal d'un solénoïde. — Enfin, le pôle austral de l'un attire le pôle boréal de l'autre, et réciproquement.

840. Moment magnétique d'un solénoïde. — Intensité d'aimantation. — Puisqu'un solénoïde se comporte comme un aimant, on peut définir le *moment magnétique* d'un solénoïde comme on a défini celui d'un aimant : c'est le moment du couple qui sollicite le solénoïde, lorsqu'il est placé dans un champ uniforme dont l'intensité magnétique est égale à l'unité, l'axe du solénoïde étant perpendiculaire à la direction de la force magnétique. — La méthode qui sert à mesurer le moment magnétique d'un aimant (728) peut également servir à mesurer, par expérience, le moment magnétique d'un solénoïde

déterminé, parcouru par un courant d'intensité déterminée. En variant les conditionsde l'expérience, on est conduit au résultat suivant, qu'on obtient d'ailleurs par le calcul, en appliquant à chaque élément du solénoïde la loi de Laplace :

Le moment magnétique M d'un solénoïde est indépendant de sa longueur l ; il est proportionnel à sa section s, au nombre N des courants circulaires, et à l'intensité i de ces courants. — Si l'on évalue i avec l'unité électromagnétique, on a

$$M = Nsi \quad (1) \quad (*).$$

Si maintenant on remarque que le volume de ce solénoïde est ls, on peut définir son *intensité d'aimantation* A, comme on a défini celle d'un aimant (728); c'est le quotient de M par ls, ou $\frac{N}{l} i$; or $\frac{N}{l}$ représente le nombre n_1 de courants circulaires compris dans l'unité de longueur, prise sur l'axe du solénoïde. On a donc

$$A = n_1 i. \quad (2)$$

Enfin, on peut exprimer l'intensité d'aimantation en fonction de la force magnétique F prise en un point quelconque, *à l'intérieur* du solénoïde, quand on le suppose de forme très allongée. Dans ce cas, l'intensité magnétique du champ créé à l'intérieur de la bobine est d'autant plus grande que le courant est plus intense et que les spires sont plus rapprochées ; on démontre que l'on a $F = 4\pi n_1 i$. En remplacant i par sa valeur, dans l'expression de A, il vient,

$$A = \frac{F}{4\pi}, \quad \text{ou} \quad F = 4\pi A. \quad (3)$$

841. Théorie du magnétisme, d'Ampère. — Les analogies que présentent les solénoïdes et les aimants ont conduit Ampère à une théorie dans laquelle on considère les aimants comme devant eux-mêmes leurs propriétés à des courants électriques, qui circuleraient autour de leurs molécules, chacun de ces courants fermés ayant sa gauche vers l'extrémité australe.

Dans la théorie d'Ampère, on considère ces courants comme existant toujours, soit dans l'acier, soit dans le fer doux, même lorsque ces corps ne manifestent pas de signes d'aimantation ; mais, dans ce cas, les courants présentent des orientations variables d'une molécule à l'autre, en sorte que leur présence ne peut se révéler par aucun effet extérieur. — On admet que l'*aimantation* a pour effet d'amener tous ces courants particulaires à circuler *dans des plans parallèles et dans le même sens*. Cette orientation est temporaire dans le fer doux aimanté par influence; elle est durable dans l'acier trempé.

(*) Cette formule (1) est la véritable formule de définition de l'*unité électromagnétique d'intensité de courant*. — Si l'on fait $M = 1$, $N = 1$, $s = 1$, on a $i = 1$. L'*unité d'intensité de courant* est donc l'intensité d'un courant circulaire fermé, dont le moment magnétique serait égal à l'unité, la surface du circuit étant d'un centimètre carré.

Chaque filet magnétique (722) d'un barreau aimanté est ainsi assimilable à un petit solénoïde. — Pour expliquer que les pôles d'un barreau aimanté sont toujours situés *à une certaine distance de ses extrémités*, on admet que les divers solénoïdes élémentaires, sous l'influence de leurs réactions mutuelles, arrivent à se courber légèrement, en divergeant les uns par rapport aux autres au voisinage des extrémités du barreau : les centres d'action du système, qui constituent les *pôles de l'aimant*, se trouvent ainsi à une certaine distance des extrémités elles-mêmes. — Quand on subdivise un solénoïde en plusieurs parties, chaque partie est encore un solénoïde ayant deux pôles disposés comme dans le solénoïde primitif. Il en est de même pour un aimant brisé en plusieurs fragments (721). — On peut, en considérant les aimants sous ce nouveau point de vue, se reporter à chacune des expériences par lesquelles nous avons constaté les actions exercés par les courants sur les aimants, et montrer qu'elles peuvent s'expliquer par les actions des courants sur les courants.

Remarque. — Dans le cas d'un aimant de forme très allongée, les filets magnétiques sont parallèles entre eux, sauf aux extrémités; les formules (1) et (2), relatives à un solénoïde, sont alors applicables à un pareil aimant, de dimensions déterminées; le moment magnétique et l'intensité d'aimantation sont d'autant plus grands, que les courants moléculaires sont plus intenses.

En tous les points *intérieurs* d'un pareil aimant, comme en tous les points intérieurs d'un sélénoïde allongé, s'exerce une force magnétique F, proportionnelle à l'intensité des courants particulaires, et par conséquent à l'intensité d'aimantation (840, *formule* 3) (*). La valeur de cette force est :

$$F = 4\pi A.$$

On doit considérer les directions des filets magnétiques, à l'intérieur d'un aimant, comme étant des lignes de force magnétiques.

842. Le champ magnétique terrestre est assimilable à celui que produirait un courant équatorial fermé, dirigé de l'est à l'ouest. — Le champ magnétique terrestre, tel que l'expérience nous le fait connaître, est uniforme dans une étendue de l'espace très considérable par rapport aux dimensions des aimants qui servent aux expériences; mais, d'un lieu à l'autre de la Terre, la direction et la grandeur de la force magnétique sont variables. — C'est en considérant l'ensemble des lignes de force de tout le champ terrestre, qu'on a pu assimiler ce champ à celui que produirait un aimant placé au centre du globe (750), et dont la ligne des pôles serait un peu inclinée sur l'axe de rotation de la Terre.

On peut aussi assimiler le champ magnétique terrestre à celui que

(*) Quoiqu'on ne puisse pas mettre facilement en évidence l'existence de cette force magnétique, comme on peut le faire pour un solénoïde, puisqu'on ne peut pas introduire une aiguille aimantée mobile à l'intérieur d'un aimant, les phénomènes d'induction, qu'on étudiera plus loin, permettent néanmoins d'en effectuer la mesure.

produirait un courant équatorial fermé, qui serait dirigé de l'est à l'ouest, et dont l'axe, dirigé à peu près du nord au sud, serait un peu incliné sur l'axe de rotation de la Terre. — La gauche d'un pareil courant fermé est du côté de l'hémisphère sud, dans lequel se trouve le pôle austral de l'aimant terrestre.

III. — ÉLECTRODYNAMOMÈTRES.

843. Principe des électrodynamomètres. — Les *électrodynamomètres*, destinés à la mesure des intensités des courants, diffèrent des galvanomètres en ce que l'aiguille aimantée, suspendue au centre de la bobine du multiplicateur, est remplacée par un solénoïde, mobile autour d'un axe perpendiculaire à l'axe de la bobine du multiplicateur. Le courant dont on veut mesurer l'intensité passe successivement *dans le multiplicateur et dans le solénoïde.*

Sous l'action du multiplicateur, une masse magnétique, australe ou boréale, égale à l'unité, serait sollicitée par une force proportionnelle à l'intensité du courant. Or le solénoïde, parcouru par ce même courant, est équivalent à un aimant d'une longueur déterminée, dont chacune des deux masses magnétiques, australe et boréale, serait aussi proportionnelle à l'intensité du courant ; on conçoit donc que les deux pôles du solénoïde seront sollicités par deux forces égales et de sens contraires, proportionnelles *au carré de l'intensité* du courant. — Ces forces tendent à amener l'axe du solénoïde parallèlement à l'axe de la bobine fixe ; si l'on fait en sorte qu'une force antagoniste, telle que la torsion d'un fil, s'oppose à ce mouvement, le système doit se mettre en équilibre dans une position déterminée. — En général, la *déviation*, si elle ne dépasse pas quelques degrés, *est proportionnelle au carré de l'intensité du courant.*

Les électrodynamomètres, généralement inférieurs aux galvanomètres sous le rapport de la sensibilité, présentent cependant sur les galvanomètres certains avantages :

1° Le sens de la déviation ne change pas quand on intervertit le sens du courant. Il en résulte qu'on peut employer les électrodynamomètres pour mesurer les intensités de courants *alternatifs*, c'est-à-dire de courants qui changent de sens à des intervalles de temps réguliers. De pareils courants sont fréquemment employés, notamment pour l'éclairage électrique : en passant dans un galvanomètre, un courant alternatif laisserait l'aiguille au repos, ou la mettrait en oscillation de part et d'autre de sa position d'équilibre.

2° On peut faire en sorte que la composante horizontale du champ terrestre n'intervienne pas dans l'établissement de la position d'équilibre du solénoïde mobile. On peut alors effectuer des mesures *absolues*

d'intensités de courants, sans qu'il soit nécessaire de connaître la valeur de la composante horizontale du champ terrestre, dans le lieu où l'on opère.

844. Électrodynamomètre absolu de M. Pellat. — L'axe de la bobine fixe AB (fig. 614) est horizontal et placé perpendiculairement au méridien magnétique. La bobine mobile *ab* est portée par un fléau de balance DOC; quand l'appareil ne reçoit pas de courant, l'axe de cette bobine est vertical, le fléau étant maintenu horizontal par une tare placée dans le plateau P. — Le fil est enroulé successivement sur les deux bobines de façon que, lorsqu'il sera parcouru par un courant, les deux extrémités A et *a* soient, pour les solénoïdes, des pôles de même nom. Supposons, par exemple, que A soit à la gauche des courants fermés de la bobine fixe : les lignes de force, à l'intérieur de cette bobine, sont alors dirigées suivant BA ; l'intensité magnétique du champ est $F = 4\pi n_1 i$ (840), en désignant par n_1 le nombre de spires par centimètre, et par i l'intensité du courant, évaluée avec l'unité électromagnétique. Si le fil fait N tours sur la bobine *ab*, la surface de chaque courant circulaire étant *s*, le moment magnétique du solénoïde *ab* est $M = Nsi$, ou $M = Si$, en représentant par S la surface totale de tous les courants circulaires qui composent la bobine mobile. Puisque l'axe de cette bobine est perpendiculaire aux lignes de force du champ magnétique, le couple des forces qui sollicite *a* du côté de A est MF. — Soit *p* grammes la masse qu'il faut ajouter sur le plateau P, pour maintenir le fléau horizontal. On peut supposer deux forces égales à pg, verticales et directement opposées, toutes les deux appliquées au point O; celle qui est dirigée de bas en haut constitue, avec le poids pg supposé appliqué au point C, un couple de moment pga, en désignant par *a* la longueur du bras de levier OC. C'est ce couple qui fait équilibre au couple provenant des actions électrodynamiques. — On a donc $MF = pga$, que l'on peut écrire :

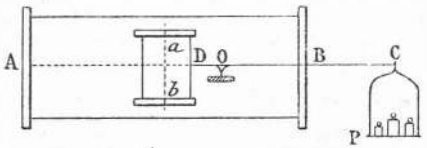


Fig. 614. — Électrodynamomètre absolu.

$$4\pi n_1 Si^2 = pga, \qquad \text{d'où l'on tire} \qquad i = \sqrt{\frac{ag}{4\pi n_1 S}}\sqrt{p}.$$

CHAPITRE VII

AIMANTATION PAR LES COURANTS TÉLÉGRAPHIE ÉLECTRIQUE

I. — DÉVELOPPEMENT DU MAGNÉTISME PAR LES COURANTS. — ÉLECTRO-AIMANTS.

845. Développement du magnétisme par les courants. — On sait que des tiges de fer ou d'acier, placées dans un champ magnétique, acquièrent une aimantation temporaire ou permanente (718, 720). Puisqu'un courant crée autour de lui un champ magnétique, il doit faire naître l'aimantation dans un corps magnétique placé dans son voisinage. — Les expériences suivantes prouvent qu'il en est ainsi.

Si, comme l'a fait Arago, on place une tige de fer en croix avec un conducteur traversé par un courant, on constate qu'il se développe, dans la tige, une aimantation qui persiste tant que le courant passe; les pôles sont placés conformément à la règle d'Ampère (*).

Si l'on place, en croix avec un courant, une aiguille d'acier trempé, non aimantée, on voit l'aimantation s'y développer avec lenteur, mais persister après le passage du courant.

846. Aimantation permanente de l'acier par les courants ou par les décharges électriques. — A la suite de ces expériences, Ampère eut l'idée d'accroître le magnétisme développé par un courant dans une aiguille d'acier, en enroulant autour d'elle le fil conducteur. — Si l'on place une aiguille d'acier dans un tube de verre, autour duquel on aura enroulé en hélice un fil métallique (*fig.* 615), et si l'on fait passer

Fig. 615.

un courant dans ce fil pendant quelques instants, on constate que l'aiguille s'aimante. Le pôle austral se développe *à la gauche de chacun des courants circulaires.* — On peut encore dire que le pôle austral se forme *à l'extrémité devant laquelle il faut se placer pour que*

(*) Si l'on plonge dans la limaille de fer un fil de cuivre, et qu'on y fasse passer un courant, on voit les grains de limaille s'attacher à ce fil et s'attirer les uns les autres, comme de petits aimants : l'attraction cesse dès qu'on ouvre le circuit.

le sens des courants circulaires paraisse inverse de celui du mouvement des aiguilles d'une montre (*).

Enfin, pour produire des *points conséquents* dans la longueur de

Fig. 616.

l'aiguille, il suffit de changer le sens de l'enroulement du fil sur le tube (*fig.* 616).

Arago a constaté qu'on peut encore aimanter une aiguille d'acier, placée dans une hélice, en faisant passer dans cette hélice les décharges d'une machine électrique ou d'une batterie, pourvu que la décharge ait une durée appréciable. — On comprend, dès lors, que la foudre puisse aimanter des masses d'acier ou de fer, situées au voisinage des points frappés; qu'elle puisse intervertir les pôles des aimants, etc.

847. Aimantation temporaire du fer doux. — Électro-aimants — On conçoit, d'après ce qui précède, qu'un barreau de *fer doux* (*fig.* 617), placé dans l'axe d'une bobine portant un fil conducteur enroulé en spirale, doit se comporter comme un aimant au moment où le fil est parcouru par un courant : le fer doux doit retomber à l'état neutre, dès que le courant est interrompu.

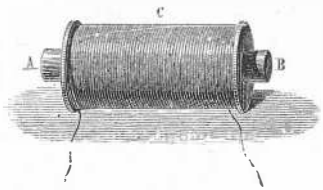


Fig. 617. — Électro-aimant.

— Le système ainsi constitué prend le nom d'*électro-aimant*.

848. Construction des électro-aimants. — Lorsqu'on se propose d'employer un électro-aimant à attirer une pièce de fer doux, il y a avantage à courber en forme de fer à cheval la barre qui doit acquérir l'aimantation. On place les deux branches du fer à cheval dans deux bobines A, B (*fig.* 618), sur lesquelles s'enroule un même fil de cuivre, couvert de soie. Les actions des deux bobines devant concorder pour développer des pôles de noms contraires aux deux extrémités A et B, les sens de l'enroulement du fil doivent être inverses sur les deux bobines. — L'attraction exercée sur le *contact* K doit cesser, dès que le courant est interrompu dans le fil (**).

(*) Le procédé le plus puissant pour aimanter les barreaux d'acier est le suivant. Le barreau à aimanter est placé dans l'axe d'un anneau, sur lequel s'enroule un fil métallique traversé par un courant intense. Il est d'ailleurs assujetti entre deux forts aimants : par exemple, entre deux électro-aimants semblables à ceux que nous étudierons plus loin. On exerce alors, avec l'anneau lui-même, des frictions répétées sur le barreau, dans le sens de sa longueur, en ayant soin de passer le même nombre de fois sur chaque moitié.

(**) Cependant on observe souvent que le contact ne se détache pas au moment même où le courant est interrompu : on peut parfois lui faire porter encore, pendant

Au lieu de courber une barre en fer à cheval, on préfère généralement réunir, par une traverse de fer doux T (*fig.* 619), deux barreaux A et B placés parallèlement. — C'est toujours ainsi que sont construits, par exemple, les électro-aimants employés dans la télégraphie électrique : on parvient ainsi plus facilement à obtenir ces trois pièces sans force coercitive, et l'électro-aimant fonctionne comme s'il ne contenait qu'une seule pièce de fer, courbée en fer à cheval (*).

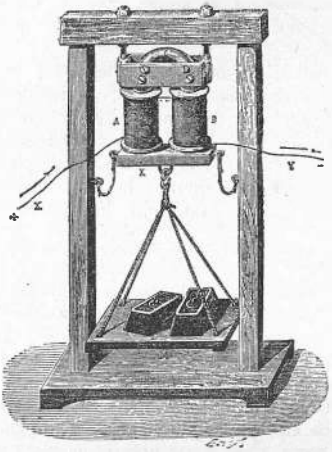


Fig. 618.
Électro-aimant en fer à cheval.

Le diamètre de la bobine constituée par le fil enroulé sur le noyau, par couches successives, ne doit pas dépasser le double du diamètre du noyau. — L'expérience a montré, en effet, que, pour une bobine dont le diamètre dépasserait cette limite, la chaleur créée dans les spires des couches profondes, pendant le passage de courants de grande intensité, ne pourrait que difficilement se perdre dans l'atmosphère, par conductibilité ou par rayonnement : le fil pourrait s'échauffer au point de brûler la matière isolante qui le recouvre.

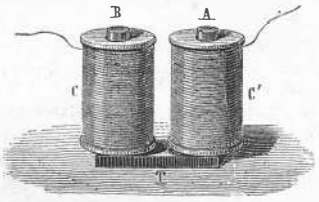


Fig. 619.
Électro-aimant à deux branches.

Enfin la section du fil enroulé sur le noyau doit être choisie de façon que la résistance de l'électro-aimant soit aussi voisine que possible de la résistance du reste du circuit dans lequel il doit être intercalé (821).

assez longtemps, le quart ou le tiers de la charge qu'il supportait pendant le passage du courant. — Cette aimantation persistante est toujours d'autant plus faible, que le fer est plus pur et mieux travaillé. — On en diminue beaucoup l'intensité et la durée, en plaçant, entre l'électro-aimant et son contact, une plaque de bois ou de carton, ou même une feuille de papier. On arrive au même résultat, en disposant un obstacle qui arrête le contact *à une petite distance* de l'électro-aimant; c'est ce qu'on fait dans la plupart des appareils de télégraphie électrique.

(*) Après avoir choisi du fer aussi pur que possible, et avoir donné aux barreaux la forme qu'ils doivent prendre, on les recuit à plusieurs reprises, et on achève de les travailler, non pas au marteau, mais à la lime : on fait ainsi disparaître sensiblement la force coercitive que l'écrouissage ne manque jamais de communiquer, même au fer le mieux préparé.

849. Coefficients d'aimantation du fer, de la fonte et des substances magnétiques en général. — Supposons qu'on enlève le noyau de fer AB d'un électro-aimant (fig. 617), et qu'on fasse passer un courant d'intensité i dans le fil C de la bobine. Ce courant produit un champ magnétique; en tout point pris *à l'intérieur* de la bobine, sauf dans le voisinage des extrémités, la force magnétique a une même valeur F, qui est proportionnelle à i. C'est cette force F qui déterminera l'aimantation de toute pièce de fer ou d'acier, placée à l'intérieur de la bobine; on lui donne, pour cette raison, le nom de *force magnétisante* de la bobine.

Le noyau de fer étant maintenant replacé, faisons passer le même courant, d'intensité i, en sorte que la force magnétisante ait encore la valeur F: le noyau devient un aimant, caractérisé par une certaine intensité d'aimantation A. Dans ce barreau de fer, transformé en un système de solénoïdes par l'orientation des courants particulaires, on sait que la *force magnétique à l'intérieur* (840) est $4\pi A$. Cette force magnétique s'ajoute à la force magnétisante, en sorte que la *force magnétique totale*, à l'intérieur du fer, est devenue :

$$F' = F + 4\pi A. \qquad (1)$$

On peut mesurer F' ainsi que F, par un procédé fondé sur les phénomènes d'induction (*). — Connaissant F' et F, on en déduit l'intensité d'aimantation A du barreau.

Si, dans une série d'expériences effectuées sur un même électro-aimant, on fait croître progressivement l'intensité i du courant, la force magnétisante F de la bobine croît proportionnellement. Or, si l'on mesure, dans chaque expérience, les valeurs de F et de F' et qu'on en déduise la valeur de A, on constate que l'intensité d'aimantation A du noyau croît à peu près proportionnellement à la force magnétisante F de la bobine, au moins tant que F ne dépasse pas une certaine limite F_1. — Avec un noyau de *fer pur*, cette limite F_1 est d'environ 8 unités C.G.S. L'intensité du courant prenant successivement des valeurs telles, que la force magnétisante F de la bobine croisse de zéro à 8, on constate que l'intensité d'aimantation A du noyau de fer croît à peu près proportionnellement de zéro à 1100. — On peut donc dire que, entre ces limites, *l'intensité d'aimantation* est sensiblement proportionnelle à la *dépense d'électricité*.

Ce qui est particulièrement digne de remarque, au point de vue des applications, c'est que, si l'on continue à augmenter l'intensité du courant, de manière à faire croître la force magnétisante F de la bobine *au delà de la limite* F_1, l'expérience montre que l'intensité d'aimantation A du noyau ne croît plus que très lentement. Pour le *fer pur*, A ne peut jamais dépasser la valeur 1300, quelle que soit la valeur de F. — Il n'y aurait donc *aucun avantage* à faire usage de courants dont l'intensité dépasserait la valeur i_1 correspondante à F_1. On pourrait doubler, tripler la *dépense d'électricité*, sans faire croître sensiblement *l'intensité d'aimantation* du noyau.

On obtient des résultats analogues quand on substitue au noyau de fer doux un noyau de fonte, ou de toute autre substance magnétique (710), cobalt, nickel, chrome.... Mais, pour ces divers corps, à une même valeur de la force magnétisante F, supposée inférieure à 8 unités, correspond toujours une intensité d'aimantation moindre que pour le fer doux (**).

(*) Voir aux problèmes.

(**) L'intensité d'aimantation maximum ne dépasse pas 800 unités pour la fonte et le cobalt, 400 unités pour le nickel.

La propriété magnétique de chaque corps est caractérisée par le rapport $\frac{\Lambda}{F} = k$, que l'on appelle *coefficient de susceptibilité magnétique* du corps. Les valeurs de ces coefficients sont environ : 140 pour le fer doux, 30 pour la fonte, 15 pour le cobalt, 10 pour le nickel.

On peut encore caractériser la propriété magnétique d'un corps par le rapport $\frac{F'}{F} = \mu$, de la force magnétique totale à la force magnétisante. En divisant tous les termes de l'équation (1) par F, il vient $\mu = 1 + 4\pi k$. Le coefficient k étant connu pour un corps, cette formule permet de déterminer μ, et réciproquement.

Ce coefficient μ a reçu le nom de *coefficient de perméabilité magnétique*. — En effet, F′ et F mesurent le nombre des lignes de force qui traversent l'unité de surface prise à l'intérieur de la bobine, dans une section perpendiculaire à l'axe, selon que l'intérieur de la bobine est occupé par le corps magnétique ou par de l'air. On trouve par exemple que, pour le fer doux, F′ est environ 1700 fois plus grand que F, tant que F est plus petit que la limite F_1 ; c'est-à-dire que pour un même courant, passant dans la même bobine, les lignes de force sont 1700 plus serrées dans le fer que dans l'air ; on peut donc dire que le fer est 1700 fois plus *perméable* que l'air, aux lignes de force magnétique. — La perméabilité magnétique va en diminuant du fer à la fonte, au cobalt, au nickel.

Pour chaque corps magnétique, les deux coefficients μ et k sont ce que nous appellerons les *coefficients d'aimantation* de ce corps.

850. Corps magnétiques, corps diamagnétiques. — D'une manière générale, toutes les substances sont sensibles à une action magnétique suffisamment intense.

Pour le constater, on emploie deux électro-aimants, actionnés par un courant très intense, et dont les axes sont placés horizontalement sur le prolongement l'un de l'autre (*fig.* 620) ; le même fil est enroulé successivement sur les deux bobines, dans un sens tel que les deux pièces polaires *a* et *b* constituent des pôles de noms contraires. — Si l'on dispose entre les deux pôles un barreau cylindrique *ef* taillé dans une substance solide quelconque (ou un tube contenant un liquide ou un gaz), suspendu en son milieu par un fil de cocon, on voit le cylindre *ef* se placer dans une position d'équilibre déterminée. — Deux cas peuvent se présenter.

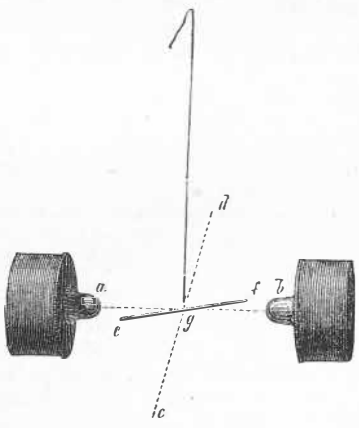


Fig. 620.

Certains corps se comportent comme le fer, ou le cobalt, ou le nickel : l'axe *ef* se dispose suivant la ligne des pôles *ab*. — Les corps de cette catégorie sont des corps *magnétiques*, mais à un degré infiniment moindre que le fer : tels sont, parmi les métaux, le platine, le palladium ;

les sels des métaux magnétiques (sels de fer, de cobalt, etc.), sont magnétiques soit à l'état solide, soit à l'état de dissolution; parmi les gaz, l'oxygène et l'ozone sont magnétiques.

Pour d'autres corps, l'axe *ef* s'oriente dans la direction *cd*, perpendiculaire à la ligne des pôles *ab*. Tels sont : le bismuth, l'antimoine, le zinc, le plomb, l'or, l'argent; l'eau et la plupart des liquides; enfin tous les gaz, sauf l'oxygène. — Ces corps ont été appelés *diamagnétiques*.

D'après cela, les corps diamagnétiques sembleraient avoir des propriétés inverses de celles du fer; en réalité, les phénomènes doivent être interprétés tout autrement. L'expérience suivante, qui est due à M. Blondlot, montre en effet qu'un même corps paraît magnétique ou diamagnétique, selon la nature du milieu dans lequel il se trouve. — Un tube de verre, rempli d'une solution *faible* de perchlorure de fer, et placé, au sein de l'air, dans le champ de l'électro-aimant (*fig.* 620), s'oriente suivant *ab*; cette solution est donc une substance magnétique. — Mais, si l'on recommence l'expérience en faisant plonger le tube dans une solution *plus concentrée* de perchlorure de fer, il s'oriente suivant *cd*. — En général, un corps se comporte comme diamagnétique quand il est dans un milieu *plus fortement magnétique* que lui.

On doit donc admettre que *tous les corps sont magnétiques*, c'est-à-dire que, dans les molécules de tous les corps, existent des courants qui peuvent s'orienter, quand ils sont placés dans un champ magnétique. Mais les divers corps sont magnétiques *à des degrés différents* : les deux effets inverses qu'on observe en opérant dans l'air, et qui avaient fait distinguer les corps en *magnétiques* et *diamagnétiques*, tiennent à ce que les premiers sont *plus magnétiques que l'air*; les seconds sont *moins magnétiques que l'air*.

Ce qui caractérise chaque corps, à ce point de vue, c'est la valeur de son coefficient k, ou de son coefficient μ, ces deux coefficients étant liés, comme on l'a vu (849), par la relation $\mu = 1 + 4\pi k$. — Pour les corps plus spécialement appelés *magnétiques*, le coefficient de perméabilité μ est plus grand que l'unité, et par suite k est positif. — Pour les corps appelés *diamagnétiques*, μ est inférieur à l'unité, et k est négatif. Ainsi, pour le bismuth, corps moins perméable que l'air aux lignes de force magnétique, on trouve

$$\mu = 0{,}99997 ; \qquad \text{par suite,} \qquad k = \frac{-1}{400\,000}.$$

II. — APPLICATIONS DES ÉLECTRO-AIMANTS. — TÉLÉGRAPHIE ÉLECTRIQUE.

851. Sonneries électriques. — Les sonneries électriques fournissent un exemple simple des applications des électro-aimants.

Un électro-aimant en fer à cheval est fixé sur une planche verticale (*fig.* 621); en face des extrémités de ses branches, se trouve une pièce de fer doux mobile L, supportée par une lame d'acier élastique fixée inférieurement en C; cette pièce de fer porte une tige munie d'un marteau M, destiné à frapper sur un timbre fixe T. A l'état de repos, cette pièce L, écartée de l'électro-aimant, appuie contre le ressort r qui communique, par le bouton D et la borne E, avec le fil conducteur qui se rend à l'un des pôles d'une pile. — La partie inférieure C de la lame d'acier qui supporte la pièce L communique, comme le montre la figure, avec l'une des extrémités du fil de l'électro-aimant; l'autre

extrémité de ce même fil est mise en communication, par la borne A, avec le fil conducteur qui se rend à l'autre pôle de la pile.

Dès que le circuit de la pile est fermé, le courant passe par le ressort *r*, par la palette L et par le fil de l'électro-aimant. Mais, le passage même du courant ayant pour effet d'aimanter l'électro-aimant, la palette L est attirée et s'éloigne du ressort *r* : le circuit est alors interrompu, et l'électro-aimant cesse d'attirer la palette. Dès lors, la lame élastique qui supporte la palette la ramène au contact du ressort *r* : le circuit est fermé de nouveau ; la palette est attirée de nouveau par l'électro-aimant, et ainsi de suite, tant que dure le passage du courant. Chaque fois que la palette est attirée, le marteau frappe un coup sur le timbre.

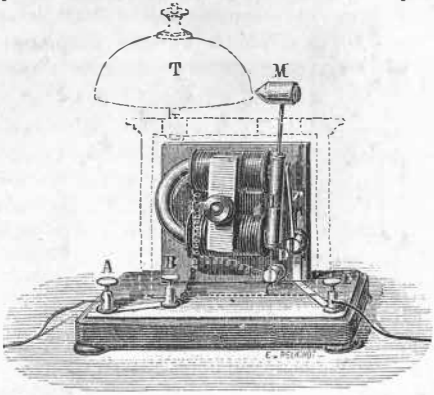


Fig. 621. — Sonnerie électrique.

Pour faire fonctionner la sonnerie à distance, on ménage, dans l'un des points du circuit, une interruption ; en ce point, est placé un bouton, sur lequel on appuie avec le doigt quand on veut rétablir le circuit et faire entrer la sonnerie en jeu.

852. Parties essentielles d'un télégraphe électrique. — Les diverses dispositions employées pour la télégraphie électrique sont fondées sur les propriétés des électro-aimants. Les parties essentielles d'un système quelconque de télégraphie électrique sont :

1° Une *pile*, placée au point d'où doit partir la dépêche ;

2° Une *ligne télégraphique*, c'est-à-dire un conducteur établissant la communication entre les points qui sont en correspondance ;

3° Un appareil *manipulateur*, placé au point de départ de la dépêche, et permettant d'interrompre ou de rétablir le courant ;

4° Un appareil *récepteur*, placé au point d'arrivée : il comprend un électro-aimant, qui entre en action chaque fois que le courant lui est transmis, et qui imprime alors un mouvement soit à une pièce de fer doux, soit à un aimant, placé dans le champ magnétique créé par le passage du courant. — Les mouvements ainsi produits peuvent être observés directement, ou transmis à tels ou tels organes, selon qu'il s'agit de tel ou tel système télégraphique.

On fait le plus souvent usage de piles qui ne sont que des modifications de la pile de Daniell, et qui présentent une constance suffisante

pendant plusieurs semaines (*). — Nous parlerons d'abord de l'établissement de la ligne, et nous décrirons ensuite le manipulateur et le récepteur de quelques-uns des systèmes les plus employés.

853. Lignes télégraphiques, aériennes ou souterraines. — La communication entre les postes d'une ligne télégraphique s'établit au moyen de fils de fer *galvanisés*, c'est-à-dire couverts d'une couche de zinc qui les préserve de l'oxydation. — Ceux de ces fils qui sont placés à ciel ouvert sont soutenus par des poteaux, et reposent sur des crochets métalliques, fixés à des supports de porcelaine isolants (*fig.* 622).

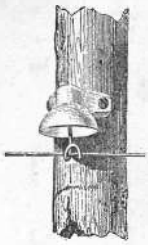


Fig. 622. — Poteau télégraphique.

Quand les fils doivent traverser une grande ville, on les entoure d'une couche de gutta-percha, et on les applique le long des voûtes des égouts. — Lorsque les conducteurs doivent être placés dans le sol, on les protège généralement, en outre, par une enveloppe métallique.

854. Suppression du fil de retour. — Du pôle positif de la pile placée à l'une des stations, part un fil qui se rend au récepteur de l'autre station, et qui constitue la ligne télégraphique; dans l'origine, on employait un second fil, pour ramener le courant au pôle négatif de la pile. On supprime aujourd'hui ce *fil de retour*, et l'on fait communiquer avec le sol, d'une part le pôle négatif de la pile, d'autre part l'extrémité libre du fil de l'électro-aimant du récepteur. La Terre joue alors le rôle d'un conducteur de section infinie, et par conséquent de résistance nulle : en employant moitié moins de fil, on obtient, avec la même pile, un courant d'intensité sensiblement double.

855. Télégraphe de Morse. — Le système télégraphique de Morse, inventé en Amérique, est aujourd'hui l'un des plus employés.

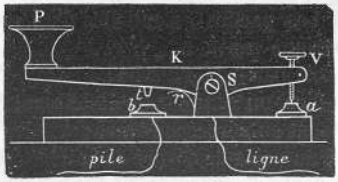


Fig. 623.

Manipulateur. — Le manipulateur se compose d'un levier métallique K (*fig.* 623), qui est mobile autour d'un axe S communiquant avec la ligne. Lorsqu'on appuie avec la main sur la poignée P, la pointe métallique *t* vient porter sur la pièce métallique *b*, qui communique avec le pôle positif de la pile : tant que dure cette pression, le courant de la pile passe sur la ligne; dès que cette pression cesse, le ressort *r* relève le levier, et le

(*) On doit à M. Marié-Davy une pile qui est destinée au service télégraphique, et qui peut être considérée comme différant de la pile de Daniell en ce que le sulfate de cuivre est remplacé par du sulfate de mercure. Le conducteur qui plonge dans le sulfate de mercure est une plaque de charbon, sur laquelle se rend le mercure mis en liberté par le courant. Ce métal coule au fond du vase poreux, où l'on peut le recueillir.

courant est interrompu. — En faisant varier la durée des contacts, on peut envoyer ainsi sur la ligne une série de courants, dont on règle à volonté le rythme et la durée (*).

Récepteur. — Les mouvements du levier du manipulateur sont fidèlement reproduits par un levier AOD (*fig.* 625), qui est la pièce principale

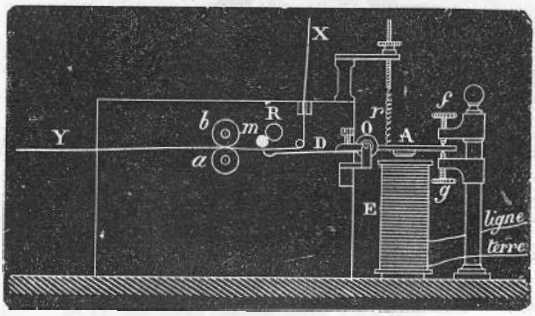


Fig. 625.

du récepteur. Ce levier est mobile autour d'un axe O : sa branche OA porte une plaque de fer doux A, placée au-dessus d'un électro-aimant E, dont le fil communique d'une part avec la ligne, d'autre part avec le sol. Au-dessus de l'extrémité de l'autre bras du levier, passe une bande de papier XY, qui est entraînée d'un mouvement uniforme entre deux cylindres horizontaux *b*, *a*, mobiles autour de leurs axes, et mis en mouvement par un mécanisme d'horlogerie contenu dans la boite B (*fig.* 626). — Tant qu'il n'y a pas de courant transmis au fil de l'électro-aimant, le ressort à boudin *r* maintient relevé le bras OA du levier. Dès que le courant passe, l'électro-aimant abaisse le bras OA du levier; par suite, l'extrémité D du levier (*fig.* 625) soulève la bande de

(*) Le manipulateur représenté par la figure 624 porte, outre les deux boutons B et C, qui servent à établir la communication de *b* avec la pile, et celle de S avec la ligne, un troisième bouton A qui est en communication avec la pièce métallique *a*. Ce bouton, qui reçoit un fil se rendant au récepteur du même poste, sert, quand le manipulateur est au repos, à faire parvenir dans ce récepteur les courants qui peuvent arriver par le fil de la ligne. On voit, en effet, que le levier métallique établit alors la communication entre C et A : le manipulateur se place donc de lui-même, quand on abandonne la poignée, dans la position de *réception*.

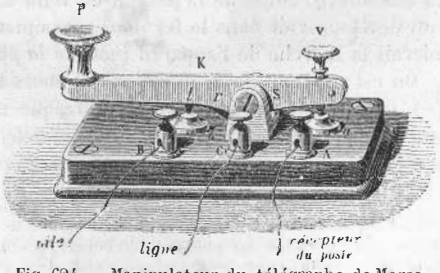


Fig. 624. — Manipulateur du télégraphe de Morse.

papier et vient l'appuyer sur une molette *m*, qui est couverte d'encre d'imprimerie : cette molette imprime alors, sur le papier, un trait dont la longueur dépend de la durée du courant (*).

Pour limiter l'amplitude des mouvements du levier AOD (*fig.* 625), on

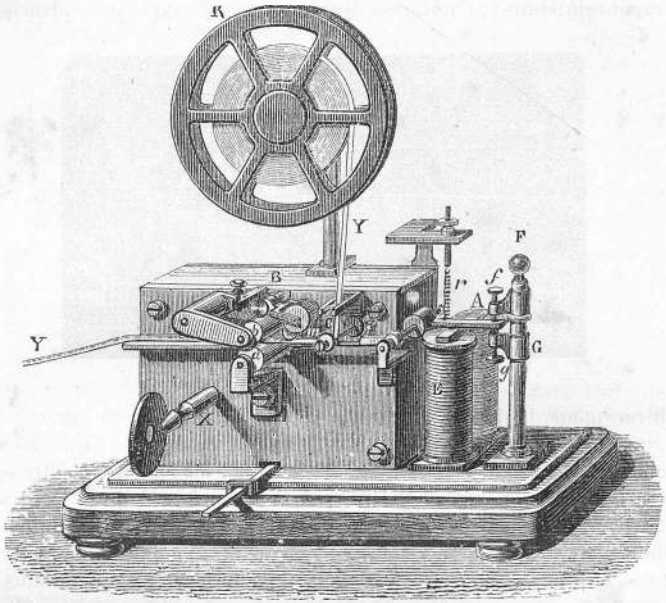


Fig. 626. — Récepteur du télégraphe de Morse.

place, au-dessus et au-dessous du prolongement de OA, deux vis fixes *f* et *g*; la première, *f*, est réglée de manière que la pièce de fer A s'éloigne peu de l'électro-aimant pendant les interruptions du courant; la seconde, *g*, empêche la pièce A de venir toucher l'électro-aimant, ce qui développerait dans le fer doux une aimantation persistante, et troublerait la marche de l'appareil (*note de la page* 692).

On est convenu de n'employer que deux traces différentes : le *point* (–), qui correspond à un courant presque instantané, et le *trait* (—), qui correspond à un courant de durée déterminée. — C'est en combinant de diverses façons ces deux traces, qu'on représente les lettres de

(*) Le récepteur représenté par la figure 626 porte quelques autres pièces accessoires, dont il est facile de comprendre le rôle. La bande de papier destinée à recevoir les dépêches est enroulée sur une sorte de bobine très mobile R; elle vient passer sur un galet C, et enfin entre les cylindres *b* et *a*, dont l'un *b* est mû par un mouvement d'horlogerie placé dans la boîte **B**. Le levier qu'on aperçoit au bas de la figure sert à arrêter le mouvement d'horlogerie ou à le mettre en marche, suivant qu'on pousse ce levier à droite ou à gauche.

l'alphabet, comme l'indique la figure 627. — On laisse, entre les lettres

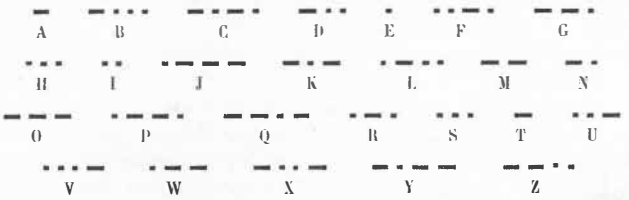


Fig. 627. — Alphabet du télégraphe de Morse.

successives qui composent un mot, un intervalle plus grand que celui qui existe entre les signaux formant une même lettre. Ainsi, le nom de l'inventeur Morse s'écrirait comme l'indique la figure suivante :

Fig. 628.

Ce système paraît, au premier abord, exiger une longue expérience : ceux qui l'on manœuvré pendant quelque temps en acquièrent cependant une telle habitude, qu'il leur suffit d'écouter les mouvements du levier, pour comprendre la dépêche *au son;* la lecture de la bande n'est plus ensuite pour eux qu'une vérification.

856. Télégraphe à cadran, de Bréguet. — Le télégraphe à cadran, dont l'invention est due à Bréguet, est celui que les administrations des chemins de fer emploient le plus souvent pour la correspondance entre les employés des diverses stations.

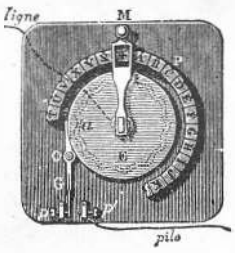


Fig. 629. — Manipulateur du télégraphe à cadran.

Manipulateur. — Un disque de cuivre horizontal E (*fig.* 629), que l'on peut faire tourner autour de son centre à l'aide de la manivelle M, porte sur sa face inférieure une rainure sinueuse, qui est indiquée sur la figure par des traits ponctués; cette rainure offre treize sinuosités, s'éloignant et se rapprochant alternativement du centre du disque; en tout, vingt-six alternatives. Dans la rainure s'engage, en *a*, une goupille métallique, fixée à l'extrémité du levier GO qui est mobile autour du point O. Lorsqu'on imprime au disque un mouvement de rotation, la goupille *a* suit les sinuosités de la rainure, qui l'éloignent et la rapprochent alternativement du centre du disque; par suite, la lame flexible qui termine l'extrémité G du levier vient toucher alternativement les deux vis *p* et *p'*. Donc, si la vis *p'* communique avec le pôle positif de la pile, et le centre du disque

avec la ligne (comme l'indique le trait ponctué marqué sur la figure), toutes les fois que *a* arrivera dans une sinuosité saillante, la lame viendra toucher *p'*, et le courant passera dans le disque et sur la ligne; toutes les fois que *a* arrivera dans une sinuosité rentrante, la lame viendra toucher *p*, et le courant sera interrompu. — L'extrémité de la manivelle M parcourt un cadran circulaire, portant vingt-six compartiments, dans lesquels sont gravées les lettres de l'alphabet et une *croix* conventionnelle (*). Une fenêtre, pratiquée dans la manivelle, permet de distinguer la lettre sur laquelle elle se trouve (dans la figure, la manivelle est placée sur la *croix*).

Pour comprendre l'envoi d'une dépêche, supposons la manivelle placée d'abord sur la croix : le levier G est en contact avec *p*, et le courant est interrompu. Si l'on transporte la manivelle sur une lettre de rang déterminé, le nombre total des établissements et des interruptions du courant sera égal au nombre qui exprime le rang de cette lettre. On passera ensuite aux lettres suivantes, en faisant toujours mouvoir la manivelle dans le même sens. — Un instant d'arrêt sur la croix servira à indiquer qu'on passe d'un mot à un autre.

Récepteur. — La partie essentielle du récepteur est un système de deux roues dentées R, R' (*fig.* 630), montées sur un même axe : ce système doit reproduire tous les mouvements du disque E du manipulateur. Chacune des deux roues porte treize dents, et *les dents de l'une alternent avec celles de l'autre*, en sorte que l'intervalle de deux dents consécutives de ce système, qui constitue l'*échappement*, est égal à un vingt-sixième de circonférence. L'axe commun des deux roues de l'échappement est sollicité à se mouvoir d'une manière continue, par un mouvement d'horlogerie; mais un arrêt G, qui, par des mouvements en avant et en arrière autour de l'axe *aa*, peut venir buter alternativement contre une dent de la roue antérieure et contre une dent de la roue postérieure, ne laisse avancer l'échappement que par intermittences : ces intermittences sont déterminées, comme on va le voir, par les courants qui arrivent de la ligne.

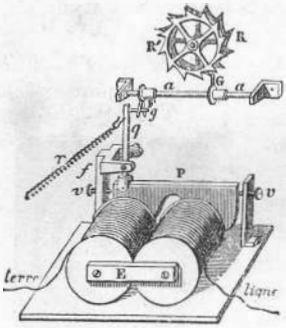


Fig. 630.

L'axe *aa*, qui porte l'arrêt, est muni, à l'une de ses extrémités, d'une

(*) Dans les appareils qui sont en usage dans les postes télégraphiques, ce cadran est une plaque métallique pleine, qui cache le disque E. Dans la figure ci-dessus, on a réduit cette plaque à son contour, pour montrer le disque E, et on en a encore enlevé une portion sur la gauche, pour rendre visible le levier G*a*.

fourchette F, à cheval sur une goupille *g*, qui est fixée à la tige *q*; cette tige est portée par une palette de fer doux P, mobile autour d'un axe passant par les pointes des vis *v*, *v*, et placée en présence des pôles d'un électro-aimant. Le fil de l'électro-aimant communique, d'une part, avec la ligne; d'autre part, avec la terre. — Or, supposons, comme nous l'avons fait pour l'envoi de la dépêche, que la manivelle du manipulateur soit placée sur la croix : le courant n'arrive pas à l'électro-aimant du récepteur; la palette P, maintenue verticale par le ressort *r*, met en prise l'arrêt G avec une dent de la roue postérieure de l'échappement : l'aiguille qui est fixée à l'axe de l'échappement, et qui est mobile sur un cadran situé à l'extérieur de la boîte (*fig.* 651),

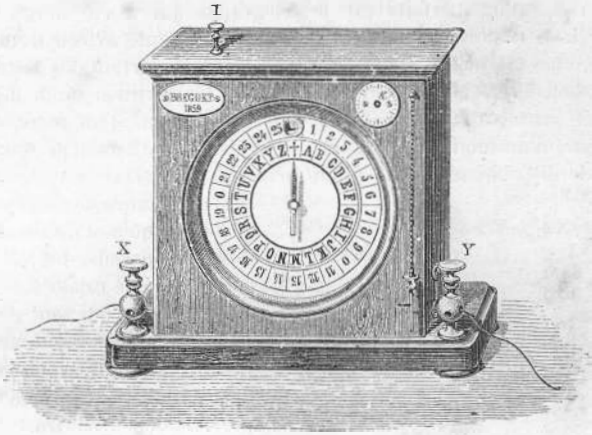


Fig. 651. — Récepteur du télégraphe à cadran.

est alors placée sur la croix de ce cadran. — Si la manivelle du manipulateur est portée sur la lettre A de son cadran, le courant arrive à l'électro-aimant du récepteur : la palette P est attirée, la tige *q* est portée en arrière, et, par suite, l'arrêt G vient en avant, abandonnant la dent de la roue postérieure, pour venir arrêter au passage la dent suivante de la roue antérieure; le système des roues a fait un vingt-sixième de tour, et l'aiguille extérieure est arrivée sur le lettre A. — De même, si la manivelle du manipulateur est portée sur la lettre B, le courant est interrompu dans l'électro-aimant du récepteur; la palette P est ramenée à sa position primitive par le ressort *r*, et l'arrêt G, se portant en arrière, vient heurter la dent suivante de la roue postérieure; l'échappement a donc fait encore un vingt-sixième de tour, et l'aiguille est portée sur la lettre B. — En continuant ainsi, on voit que tous les mouvements effectués par la manivelle du manipulateur, au poste de départ, sont reproduits par l'aiguille du récepteur, au poste d'arrivée.

857. Télégraphes imprimants. — Télégraphes de Hughes, de Baudot. — Le télégraphe à cadran présente, comme on vient de le voir, le double avantage d'employer les lettres ordinaires de l'alphabet, et de pouvoir être manié sans apprentissage préalable ; mais il a l'inconvénient de ne laisser aucune trace de la dépêche. — En revanche, le télégraphe de Morse (855), qui écrit lui-même la dépêche, l'écrit en caractères qui ne sont déchiffrables qu'avec une certaine habitude. — On fait usage aujourd'hui, sur la plupart des grandes lignes télégraphiques, d'appareils qui impriment les dépêches *en caractères ordinaires*, de sorte que la feuille imprimée peut ensuite être directement transmise à celui auquel la dépêche est destinée.

L'un des plus parfaits est le télégraphe qui a été imaginé par M. Hughes, de New-York. Le manipulateur présente extérieurement la forme d'un clavier de piano, dont les touches portent les lettres de l'alphabet, les signes de ponctuation, etc. L'expédition de la dépêche se fait avec la même célérité que l'exécution d'un morceau de musique, d'un mouvement rapide. — Le télégraphe Baudot présente une série de dispositions telles, qu'un même fil peut servir à la transmission simultanée de plusieurs dépêches (jusqu'à six), envoyées par divers appareils, fonctionnant avec la même rapidité. — Mais ces appareils, qui sont de véritables merveilles de mécanisme, présentent une complication trop grande pour qu'il nous soit possible de les décrire.

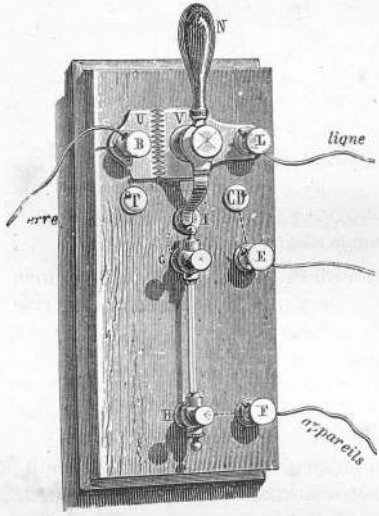


Fig. 652. — Paratonnerre.

858. Paratonnerre, pour les appareils des stations télégraphiques. — Dans les temps d'orages, les fils des lignes télégraphiques s'électrisent par influence ; des courants parfois très intenses s'établissent sur la ligne, et peuvent arriver à détériorer les appareils, ou à compromettre la sûreté des employés. — Plusieurs moyens sont employés pour éviter ces accidents. Nous décrirons seulement un petit appareil construit par M. Bréguet et connu sous le nom de *paratonnerre*.

Deux plaques métalliques U et V (*fig.* 652) sont séparées par un intervalle très petit, et armées de pointes sur leurs bords en regard. Le fil de la ligne aboutit à la plaque V ; cette même plaque porte un commuta-

teur N, dont le ressort métallique peut à volonté être amené sur l'une des trois pièces de cuivre, en forme de *gouttes de suif*, T, I, CD. Lorsque le commutateur appuie sur I, comme le représente la figure, le courant arrivant de la ligne passe de I en G, par une communication métallique qui est indiquée sur la figure par un trait ponctué ; puis de G en H, à travers un fil de fer très fin, qui est contenu dans un tube de verre ; enfin de H en F et aux appareils du poste : cette position du commutateur est donc la position de *réception*.

Si, par un temps d'orage, il se développe subitement sur la ligne un courant électrique intense, le fil de fer, en raison de sa faible section, est fondu, et la communication est interceptée entre la ligne et les appareils, avant que le courant ait acquis assez d'intensité pour les détériorer. — Si la tension électrique sur le fil de la ligne est très considérable, une décharge se produit, par les pointes métalliques, de la plaque V à la plaque U qui communique avec la terre, et l'électricité se perd dans le sol (*).

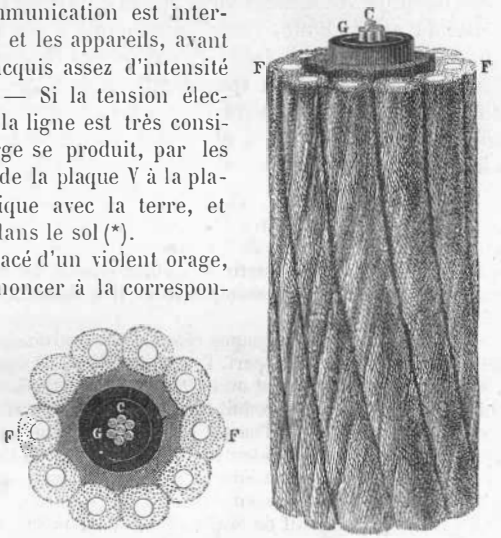


Fig. 655. — Câble transatlantique (grosseur réelle).

Quand on est menacé d'un violent orage, il est prudent de renoncer à la correspondance qui, d'ailleurs, deviendrait bientôt impossible. On pousse alors le commutateur sur la *goutte de suif* T, qui est en communication permanente avec la plaque U ; l'électricité accumulée sur la ligne passe par le commutateur sur la plaque U, et va se perdre dans le sol.

859. Télégraphie sous-marine. — Câbles sous-marins. — Les conditions particulières dans lesquelles doit être établie une ligne télégraphique sous-marine exigent des dispositions spéciales, pour que le conducteur soit bien isolé de l'eau de mer, et pour qu'il présente

(*) Les bureaux qui correspondent avec deux postes situés l'un à droite, l'autre à gauche, sont munis de deux paratonnerres fixés symétriquement sur le même support. Ces deux appareils sont mis en communication permanente, par un fil métallique fixé en E. Quand on veut établir la correspondance directe entre les deux postes de droite et de gauche, sans que le courant de la ligne passe par les appareils du bureau, on pousse les commutateurs N des deux paratonnerres sur les *gouttes de suif* marquées CD ; les fils de ligne qui pénètrent dans le bureau sont mis ainsi en *communication directe*.

une résistance suffisante aux tractions qu'il pourra éprouver, soit pendant la pose, soit après son installation.

Un *câble sous-marin*, tel que ceux qu'on emploie aujourd'hui, contient dans son axe un conducteur métallique; c'est un fil de cuivre, ou plutôt un faisceau de fils de cuivre C, exactement juxtaposés (*fig.* 633). La multiplicité des fils présente cet avantage que, s'il vient à se produire quelques ruptures, il y a des chances pour qu'elles ne portent pas au même endroit sur tous les fils, et pour que la transmission puisse encore s'effectuer. — Pour isoler ce conducteur de l'eau de mer, on l'entoure de gutta-percha, ou de diverses substances encore plus isolantes. Le conducteur C et son enveloppe isolante G constituent l'*âme* du câble. Enfin, l'âme est entourée d'une *armature* formée par une couche de fils de fer F, F, environnés chacun d'une enveloppe de chanvre, et tournés en spirale autour de l'âme. L'armature est destinée à protéger l'âme pendant la pose, à la garantir ensuite des frottements contre les rochers, et enfin à donner de la résistance au câble, s'il vient à être accroché par les ancres des navires (*).

860. Récepteur de W. Thomson. — Siphon-recorder. — L'expérience a montré que les récepteurs des divers systèmes précédemment décrits, lorsqu'ils viennent à être placés à l'extrémité d'un câble sous-marin, n'obéissent que lentement aux alternatives d'établissement et d'interruption du courant, déterminées par le manipulateur. Il a donc fallu faire usage d'autres récepteurs.

On a d'abord employé, comme *récepteur*, le galvanomètre de Thomson (824). Selon que, au poste de départ, l'extrémité du fil de ligne est mise en communication avec le pôle positif ou avec le pôle négatif de la pile, la déviation du miroir du récepteur se produit d'un côté ou de l'autre. On obtient ainsi deux espèces de signaux, que l'on peut combiner comme le *point* et le *trait* du système Morse, pour représenter toutes les lettres de l'alphabet.

Le *manipulateur* de ce même système consiste en une sorte de clef, qui permet d'établir rapidement la communication du fil de ligne, soit avec le pôle positif, soit avec le pôle négatif de la pile, et qui, en même temps, met en communication l'autre pôle avec le sol. — Ce manipulateur présente, en outre, certaines particularités de construction, destinées à supprimer l'influence des *courants de retour* qui se produisent dans les lignes sous-marines, et qui troubleraient les indications.

(*) Les dangers que peut courir le câble, une fois qu'il est posé, ne sont pas les mêmes pour toute sa longueur. Dans les mers profondes et à une grande distance des côtes, on n'a plus à craindre que le câble soit tiraillé par les ancres des navires : il est même complètement à l'abri des frottements produits par l'agitation des flots, car on sait que, pendant les plus grandes tempêtes, il règne toujours, à partir d'une profondeur de 25 à 30 mètres, un calme absolu, contrastant avec l'agitation de la surface. On réserve donc les armatures puissantes pour les deux extrémités voisines des côtes, pour les *bouts côtiers*. Pour toute la partie intermédiaire, on diminue le diamètre des fils de fer, de manière à réduire la dépense, et à ne pas charger inutilement le navire qui doit effectuer la pose. — Le câble transatlantique posé en 1866, l'un des premiers en date et l'un des plus légers eu égard à son diamètre (ce diamètre est reproduit exactement dans la figure 633), pesait encore 865 kilogrammes par kilomètre, c'est-à-dire, en tout, près de 4 millions de kilogrammes.

Plus récemment, sir William Thomson a substitué, au galvanomètre récepteur, un appareil qui laisse une trace écrite des signaux, et qui porte en anglais le nom de *siphon-recorder*, ou enregistreur à siphon. C'est un galvanomètre apériodique (826), à cadre mobile et à aimant fixe; l'aimant est ici remplacé par un électro-aimant AB (*fig.* 654). Le multiplicateur *s*, placé entre les pôles de l'électro-aimant, est suspendu par deux fils; à la partie inférieure du cadre est suspendue une masse Q, mobile sur un plan incliné au moyen duquel on règle la tension du fil. Le courant est amené dans le multiplicateur par deux spirales très flexibles, mises en communication avec les boutons *p* et *q* qui communiquent, l'un avec la ligne, l'autre avec le sol.

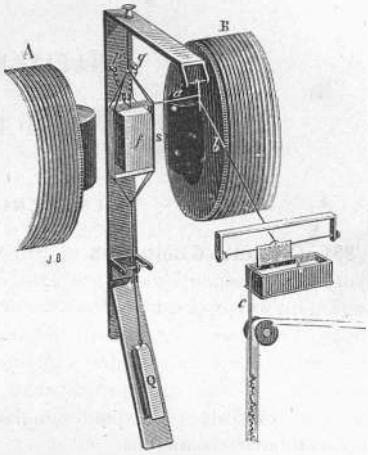


Fig. 654.
Siphon-recorder, ou enregistreur à siphon.

Quand le courant passe dans le multiplicateur, celui-ci est dévié de sa position d'équilibre, dans un sens ou dans l'autre, selon le sens du courant lancé par le manipulateur à l'autre extrémité de la ligne. Le mouvement est transmis par le fil *ab* à un tube de verre très fin et très léger *c*, courbé en siphon; l'encre qui s'écoule par ce siphon *c* est électrisée par une petite machine électrique, non représentée sur la figure; elle est alors attirée par une bande de papier qui communique avec le sol, et qui se déroule devant l'extrémité du siphon. — Quand le multiplicateur est au repos, l'encre trace sur le papier un trait continu rectiligne. Quand le cadre est en mouvement, le trait devient sinueux : les dents à droite ou à gauche correspondent aux courants positifs ou négatifs, lancés par le manipulateur; ce sont les signaux qui correspondent aux points et aux traits du système Morse.

CHAPITRE VIII

COURANTS D'INDUCTION.

I. — PHÉNOMÈNES GÉNÉRAUX.

861. Courants d'induction. — On appelle *courants induits*, des courants qui prennent naissance dans un circuit fermé, placé au voisinage d'un autre circuit parcouru par un courant (*courant inducteur*), ou au voisinage d'un aimant (*aimant inducteur*), lorsqu'on imprime, aux uns ou aux autres, des déplacements modifiant leurs distances relatives. — L'énergie qui apparaît dans les divers effets produits par ces courants correspond au *travail* dépensé pour effectuer les déplacements eux-mêmes.

Les courants d'induction ont été découverts par Faraday en 1831. — Nous allons d'abord constater, par l'expérience, les phénomènes fondamentaux de l'induction.

862. Induction produite par un courant, ou induction volta-électrique. — Soient deux bobines A et B (*fig.* 655), formées chacune d'un fil de cuivre couvert de soie et enroulé sur un cylindre de bois creux. La bobine A étant reliée aux pôles d'une pile V, on obtiendra un premier circuit VA : ce sera le *circuit inducteur*. La bobine B étant reliée aux bornes du galvanomètre G, on obtiendra un second circuit fermé BG, qui sera le *circuit induit*. — On peut effectuer les trois expériences suivantes :

1° Les deux bobines étant séparées (*fig.* 655), et le courant inducteur étant établi dans le circuit VA, on introduit brusquement la bobine A dans la bobine B : on constate qu'il se développe, dans le circuit BG, un courant accusé par une déviation de l'aiguille du galvanomètre. Le sens dans lequel se produit cette déviation montre que le courant induit, qui prend naissance quand on *diminue la distance* des deux circuits, est *de sens contraire au courant inducteur*. — Ce courant n'a d'ailleurs qu'une durée extrêmement courte : l'aiguille, qui avait été brusquement écartée du zéro de la graduation, revient immédiatement sur elle-même ; elle oscille régulièrement de part et d'autre du zéro, et finit par s'arrêter dans cette position, qu'elle conserve tant que la distance des deux circuits reste constante.

Si maintenant, une fois l'aiguille revenue au zéro, on éloigne brusquement la bobine A de la bobine B, on observe une nouvelle déviation de l'aiguille, de sens contraire à la première. Donc, quand on *augmente la distance* des deux circuits, il se développe un courant induit, qui est *de même sens que le courant inducteur.*

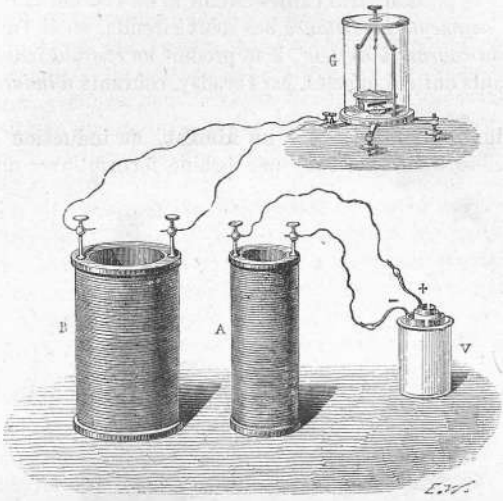


Fig. 635. — Induction produite par un courant.

Nous appellerons *courant induit inverse*, celui qui se produit en sens inverse du courant inducteur; *courant induit direct*, celui qui se produit dans le même sens que le courant inducteur.

2° Le circuit VA étant ouvert, et la bobine A étant placée dans la bobine B, et si l'on vient à *fermer* le circuit inducteur, on obtient un courant induit *inverse* (courant de fermeture). — Une fois l'aiguille revenue au zéro, si on vient à *rompre* le circuit VA, on obtient un courant induit *direct* (courant de rupture).

3° Enfin, la bobine A étant placée dans la bobine B, et le circuit VA étant fermé, si l'on vient à *augmenter l'intensité* du courant inducteur, par exemple en diminuant la résistance sans interrompre le circuit, on observe un courant induit *inverse*. — Si l'on *diminue l'intensité* du courant inducteur, on observe un courant induit *direct*.

Les résultats de la deuxième expérience sont évidemment compris dans ceux de la troisième : fermer ou rompre le circuit inducteur, c'est augmenter l'intensité du courant inducteur, à partir de zéro, ou diminuer cette intensité jusqu'à zéro. On est ainsi conduit à l'énoncé général suivant :

Étant donnés deux circuits fermés A et B, et l'un de ces circuits A étant parcouru par un courant, dit courant inducteur, *si l'on diminue la distance* des deux circuits, ou *si l'on augmente l'intensité du courant inducteur*, il se produit, dans l'autre circuit B, un *courant induit inverse*. — Si l'on *augmente la distance* des deux circuits, ou si l'on *diminue l'intensité du courant inducteur*, il se produit *un courant induit direct*.

Ces courants ont été appelés, par Faraday, courants d'*induction volta-électrique*.

863. Induction produite par un aimant, ou induction magnéto-électrique. — Soit B (*fig.* 636) une bobine formant avec un galvano-

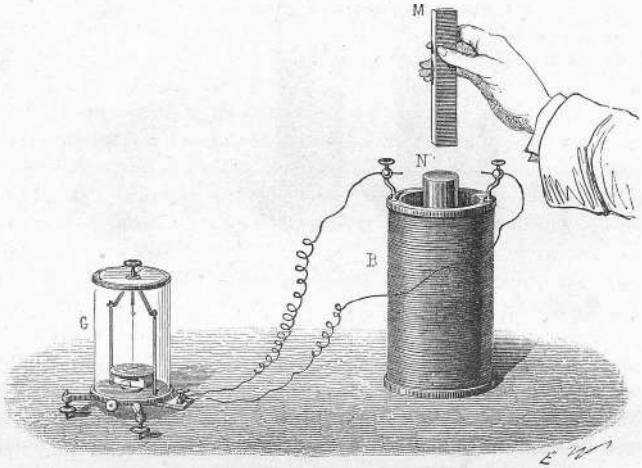


Fig. 636. — Induction produite par un aimant.

mètre G un circuit fermé BG. Un barreau de fer doux N étant placé dans la bobine, si l'on fait *naître l'aimantation* dans ce barreau, en approchant brusquement de son extrémité l'un des pôles d'un aimant M, le galvanomètre accuse la production d'un courant induit, dont le sens est *inverse* de celui des courants particulaires (841), orientés par l'aimantation dans le fer doux N. — Si maintenant, une fois l'aiguille du galvanomètre revenue au zéro, on *supprime l'aimantation* dans le barreau N, en enlevant brusquement l'aimant M, l'aiguille accuse un courant induit *direct*, c'est-à-dire de même sens que les courants particulaires du fer doux.

De même si, après avoir retiré de la bobine le barreau N, on y introduit brusquement l'aimant, il se produit un courant *inverse*. — Si l'on enlève l'aimant, il se produit un courant *direct*.

En résumé : *Si l'on fait naître l'aimantation dans un corps magné-*

tique placé à l'intérieur d'un circuit fermé, ou si l'on approche un aimant de l'intérieur de ce circuit, il se produit un courant d'induction dont le sens est *inverse de celui des courants particulaires de l'aimant. — Si l'aimant inducteur perd son magnétisme, ou si l'on éloigne cet aimant,* il se produit un courant d'induction *direct.*

Ces courants ont été appelés, par Faraday, courants *d'induction magnéto-électrique.* — On voit qu'ils résultent des *variations de l'intensité du champ magnétique,* dans la région occupée par le circuit induit. — Si l'intensité du champ magnétique *augmente,* il se produit un courant induit *inverse* ; si l'intensité du champ *diminue,* il se produit un courant induit *direct.*

La même interprétation s'applique d'ailleurs aux courants d'induction *volta-électriques.* — En effet, le circuit A (*fig.* 635), quand il est parcouru par un courant, donne naissance à un champ magnétique (818), comme le ferait un aimant ; or, en chacun des points de la région occupée par le circuit B, l'intensité du champ magnétique va en croissant quand on augmente l'intensité du courant inducteur A, ou quand on diminue la distance des deux circuits A et B ; l'intensité du champ magnétique va en décroissant dans les cas inverses. On peut donc dire que, ici encore, c'est aux *variations d'intensité du champ magnétique,* au voisinage du circuit B, que sont dus les courants induits.

864. Emploi du fer doux comme moyen d'augmenter l'induction volta-électrique. — Dans la bobine A, qui nous a servi comme *inductrice* dans l'étude des phénomènes d'induction volta-électrique (862), introduisons un noyau de fer doux. Ce noyau s'aimantant par le courant de la pile, et ses courants particulaires s'orientant alors dans le même sens que celui de la bobine A, leurs actions inductrices, sur la bobine B, doivent s'ajouter à celle de A. — On constate, par

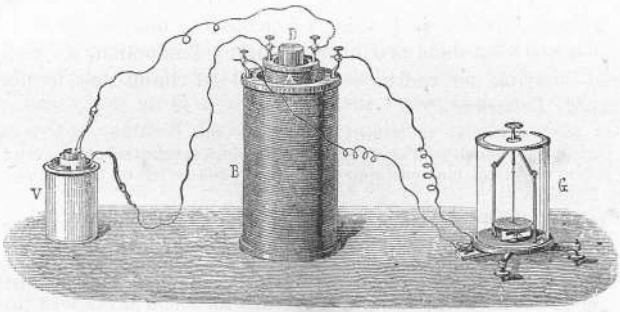


Fig. 637. — Emploi du fer doux, pour augmenter l'induction volta-électrique.

exemple, que si la bobine A, munie de son noyau D, est placée dans la bobine B (*fig.* 637), le courant induit *de fermeture,* accusé par le

galvanomètre, est beaucoup plus intense qu'en l'absence du noyau. — Il en est de même du courant induit *de rupture*, l'orientation des courants particulaires du fer disparaissant en même temps que le courant de la pile (*).

On peut dire qu'un noyau de fer doux, placé dans une bobine inductrice, a pour effet d'augmenter l'action inductrice exercée sur un circuit fermé voisin, en donnant, pour une même intensité du courant de la pile, une intensité totale plus grande au *champ magnétique* créé autour de cette bobine.

865. Induction produite par la Terre, ou induction telluro-électrique. — On sait qu'il existe autour de la Terre un champ magnétique (750). L'expérience suivante montre qu'on peut obtenir un courant induit, dans un circuit fermé, en imprimant à ce circuit un déplacement rapide par rapport à la direction des lignes de force du champ terrestre.

Sur un cadre circulaire MN (*fig.* 658), mobile autour d'un axe horizontal AB, est enroulé plusieurs fois un fil conducteur couvert de soie; ses deux extrémités sont reliées aux deux bornes d'un galvanomètre. L'axe de rotation AB étant placé perpendiculairement au méridien magnétique, et le plan du cadre étant d'abord perpendiculaire à l'aiguille d'inclinaison, c'est-à-dire aux lignes de force du champ terrestre (755), si l'on fait tourner brusquement le cadre de 180 degrés, on observe une déviation du galvanomètre. Il s'est donc produit un courant d'induction, par ce déplacement imprimé au cadre. — L'appareil est connu sous le nom de *cerceau de Delezenne* (**).

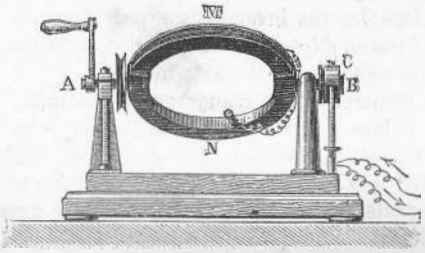


Fig. 658. — Induction produite par la Terre.

(*) L'expérience montre qu'un *faisceau de fils* de fer, substitué au barreau D, renforce le courant induit plus énergiquement encore que ne fait un barreau unique de même diamètre.

(**) Un nouveau déplacement de 180°, dans le même sens, donne naissance à un nouveau courant induit, qui parcourt le fil du cadre *en sens inverse*. — On fixe généralement, sur l'axe de rotation, un *commutateur* C (*fig.* 658), semblable à celui des figures 600 et 601 : les deux extrémités du fil du cadre aboutissent aux deux faces métalliques du commutateur; et c'est par les deux ressorts fixés sur le pied de l'appareil qu'on établit les communications avec le galvanomètre. Dès lors, si l'on imprime au cadre un mouvement de rotation continu, les contacts des faces métalliques avec les ressorts étant intervertis à chaque demi-rotation, les courants induits parcourent toujours le fil du galvanomètre *dans le même sens*. — On peut ainsi obtenir une déviation *stable* de l'aiguille du galvanomètre, tant que le mouvement de rotation reste uniforme.

866. Induction d'un courant sur lui-même, ou self-induction. — On a vu (862, 2°) que, lorsqu'un courant parcourt un circuit, et qu'on vient à rompre ou à refermer ce circuit, il y a production d'un courant induit, dans tout circuit fermé voisin du premier. — Il est naturel de penser que chacun des éléments d'un courant doit aussi exercer une action inductrice sur les éléments voisins qui font partie *de son propre circuit* : cette action doit être surtout sensible, si le circuit est enroulé sur lui-même, de manière que chacun de ses éléments ait dans son voisinage un grand nombre d'autres éléments. C'est la disposition adoptée dans les deux expériences suivantes, qui sont dues à Faraday. — Ces courants ont reçu le nom d'*extra-courants*, ou de courants de *self-induction*.

1° On fait passer le courant d'une pile PN (*fig.* 659) dans un long fil

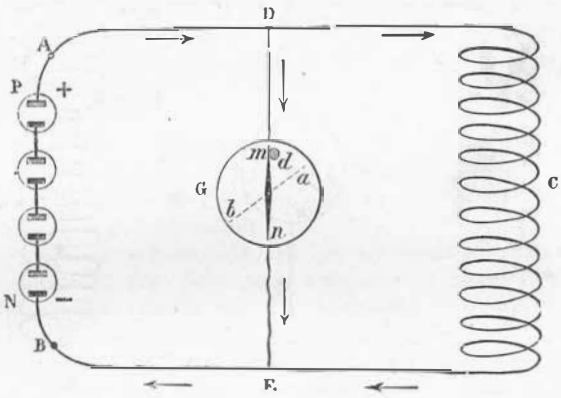


Fig. 659. — Démonstration de la self-induction directe.

métallique, que l'on enroule en une hélice C dans une grande partie de sa longueur : on réunit deux de ses points D, E, situés de part et d'autre de l'hélice, par un fil de dérivation, sur le trajet duquel est intercalé un galvanomètre G. Le courant de la pile se partage ainsi entre les deux branches de dérivation, DCE, DGE, qu'il parcourt dans le sens des flèches indiquées sur la figure ; si *mn* est la direction du diamètre passant par le zéro du galvanomètre, on voit le pôle austral de l'aiguille venir, sous l'action du courant, à droite de *mn*, en *a* par exemple. On ramène alors l'aiguille, avec la main, dans la direction *mn*, et l'on place sur le cadran un petit obstacle *d*, à droite du point *m*, de manière à empêcher l'aiguille de s'écarter de ce côté. — Les choses étant ainsi disposées, si l'on interrompt le courant au voisinage de la pile, en A par exemple, le pôle austral reçoit une vive impulsion à gauche, après laquelle l'aiguille revient au zéro. Donc, *au moment de la rupture* du

courant de la pile, le circuit fermé DGECD a été parcouru par un courant, et ce courant avait, dans la portion DGE, un sens contraire à celui du courant de la pile; par suite, il avait, dans l'hélice C, le *même sens que le courant de la pile*. — C'est là, comme on l'a vu (862, 2°), le caractère d'un courant induit dû à la rupture d'un courant inducteur : c'est l'*extra-courant de rupture*, ou courant de *self-induction direct*.

2° On détermine, par une expérience préliminaire, la position *ab* (*fig.* 640) que prend l'aiguille du galvanomètre sous l'action du courant de la pile, et l'on place sur le cadran un petit obstacle *f* à la gauche du point *a*, de manière à empêcher l'aiguille de revenir au zéro quand on interrompra le courant en A. — Les choses étant ainsi disposées, et le circuit de la pile étant ouvert au point A, on constate que, à l'instant

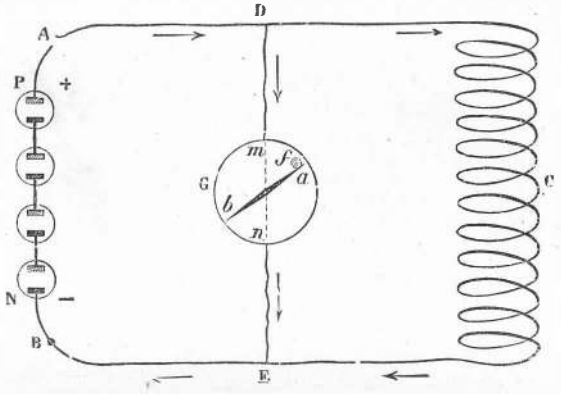


Fig. 640. — Démonstration de la self-induction inverse.

où l'on referme le circuit en A, le pôle austral de l'aiguille reçoit une vive impulsion à droite, après laquelle il revient en *a*. Donc, *au moment de la fermeture* du circuit, le fil DGE n'a pas été seulement parcouru par une portion du courant de la pile, ayant une intensité telle qu'elle amenât l'aiguille en *ab*; mais à ce courant s'en est ajouté un autre, d'une durée très courte, ayant le même sens dans la partie DGE, et ayant, par conséquent, dans l'hélice C, *un sens contraire à celui du courant de la pile*. — C'est le caractère d'un courant induit dû à la fermeture du courant inducteur : c'est l'*extra-courant de fermeture*, ou courant de *self-induction inverse*.

867. Loi de Lenz. — Dépense de travail, nécessaire à la production des courants d'induction. — La loi suivante, énoncée par le physicien russe Lenz, permet de définir *le sens* du courant induit qui prend naissance dans un circuit fermé, quand on déplace ce circuit d'une manière quelconque dans un champ magnétique.

Le sens du courant induit est tel, que l'action électromagnétique du champ sur ce courant tende à s'opposer au mouvement qui donne naissance au courant lui-même. — Si l'on se reporte aux résultats des expériences qui précèdent, il est aisé de voir que chacun d'eux satisfait à la loi de Lenz. — Pour appliquer la loi aux courants d'induction produits par les variations d'intensité du courant inducteur, et aux courants de self-induction, il suffit de remarquer qu'un accroissement d'intensité du courant inducteur, augmentant l'intensité du champ magnétique, doit avoir le même effet qu'une diminution de la distance des deux circuits.

La loi de Lenz n'a pas seulement l'avantage de réunir dans un même énoncé tous les résultats relatifs aux sens dans lesquels se propagent les courants d'induction. Elle rend manifeste la nécessité d'une *dépense de travail*, pour la production même de ces courants.

Considérons, par exemple, un circuit fermé, que l'on mettra en mouvement de manière à le rapprocher d'un aimant. Tant que durera ce rapprochement, il se produira un courant induit, dont le sens sera tel, qu'il tende à s'opposer au rapprochement lui-même : dès lors, le travail nécessaire à l'accomplissement de ce mouvement sera *plus grand* que si le même circuit avait subi le même déplacement en dehors du champ magnétique. — C'est, en effet, ce que montre l'expérience suivante, qui est due à Foucault.

Entre les pièces de fer doux A et B, qui forment les armatures d'un électro-aimant EE (*fig.* 641), passe librement un disque de cuivre D, que l'on peut faire tourner autour de son axe, au moyen d'un système de roues dentées et d'une manivelle qui n'est pas représentée sur la figure. Tant que l'électro-aimant n'est pas aimanté, il suffit d'un effort très faible pour imprimer au disque un mouvement de rotation très rapide. — Mais si, au moment où le disque est animé d'une grande vitesse, on vient à faire passer dans le fil de l'électro-aimant le courant de quelques éléments de Bunsen, de manière à donner naissance à un champ magnétique intense, on constate que le disque est brusquement arrêté : cet arrêt est dû à la résistance développée par les courants induits, qui se sont produits dans le disque lui-même. — Si l'on veut alors continuer à faire tourner le disque, on ne parvient à lui imprimer qu'un mouvement de rotation beaucoup

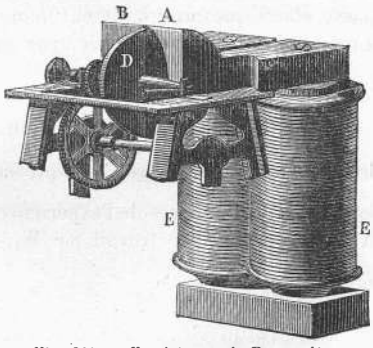


Fig. 641. — Expérience de Foucault.

plus lent, même avec un effort considérable. Le travail mécanique dépensé se transforme alors en énergie électrique, par la production de courants induits circulant dans le disque pendant la rotation; cette énergie électrique apparaît bientôt sous forme de chaleur : il se produit, en effet, dans la masse de cuivre, une élévation de température que l'on peut constater en y appliquant la main.

En résumé, on peut donc dire que la production des courants d'induction, par déplacement d'un circuit fermé dans un champ magnétique, constitue un mode de transformation de l'énergie mécanique en énergie électrique, sous forme de courants. — Dans les effets produits par ces courants, se retrouve, soit sous forme de chaleur, soit sous toute autre forme, l'équivalent de l'énergie dépensée (*).

868. Force électromotrice d'induction. — Dans le cas d'un courant produit dans un circuit par une pile, nous avons appelé *force électromotrice*, la quantité d'énergie communiquée à chaque unité de masse électrique parcourant le circuit (755).

Or, considérons maintenant un circuit fermé, dont une partie sera mise en mouvement dans un champ magnétique invariable : ce sera, par exemple, une bobine à laquelle on imprimera un mouvement de rotation dans un champ magnétique, et dont les extrémités seront réunies par un conducteur extérieur au champ. Nous ferons d'abord abstraction des phénomènes de self-induction qui pourraient se produire dans ce circuit (**). — Soit W joules le travail dépensé pour imprimer à la bobine un déplacement déterminé, et θ la durée de ce déplacement; si l'intensité du courant induit est de i ampères, la masse électrique mise en mouvement est de $i\theta$ coulombs. Par suite, la quantité d'énergie dépensée, par coulomb, c'est-à-dire la *force électromotrice*, a pour valeur $\frac{W}{i\theta}$.

On peut donner à cette expression une autre forme, indépendante de i. En effet, le quotient $\frac{W}{i}$ représente le travail dépensé, dans les conditions particulières de l'expérience, *par unité d'intensité de courant*. Si l'on représente ce travail par W_1, l'expression de la force électromotrice devient $\frac{W_1}{\theta}$.

(*) Nous avons dit (826) que, dans les galvanomètres, l'amortissement progressif des oscillations de l'aiguille aimantée est dû à la production de courants induits, qui prennent naissance dans le fil du multiplicateur. Dans ce cas, c'est le champ magnétique qui se déplace, par rapport au circuit fermé qui est fixe : la force vive de l'aiguille disparaît progressivement et se transforme en énergie électrique, sous forme de courants induits parcourant le cadre du multiplicateur, alternativement dans un sens et dans l'autre.

(**) La self-induction complique toujours les phénomènes électriques, toutes les fois qu'un courant d'intensité variable se propage dans un conducteur, quelle que soit l'origine de ce courant.

Supposons maintenant que $\frac{W_1}{0}$ conserve une valeur constante pendant les divers intervalles de temps qui se succèdent; le courant conserve une intensité constante de i ampères. Or, d'une part, pendant chacun de ces intervalles de temps 0, le travail dépensé pour produire le courant est $W = W_1 i$ joules; d'autre part, l'énergie calorifique qui apparaît pendant le même temps 0, dans tout le circuit de résistance R, est exprimée, d'après la loi de Joule (802), par $i^2 R 0$. D'après le principe de la conservation de l'énergie, on doit avoir

$$W_1 i = i^2 R 0,$$

d'où :

$$i = \frac{W_1}{0} \times \frac{1}{R}.$$

L'intensité du courant d'induction est donc proportionnelle à la force électromotrice d'induction $\frac{W_1}{0}$ et en raison inverse de la résistance du circuit : c'est l'énoncé des lois d'Ohm (800) — Dès lors, une bobine qui fait partie d'un circuit fermé, et qui est mise en mouvement dans un champ magnétique, de façon que l'intensité du courant induit reste constante, est assimilable à une pile dont la force électromotrice serait représentée par $\frac{W_1}{0}$ (*).

L'assimilation subsiste encore *quand le circuit est ouvert*. — Les deux extrémités du fil de la bobine étant séparées, on peut imaginer qu'on relie l'une d'elles au sol et qu'on mette l'autre en communication avec un électromètre; l'instrument indiquerait alors, entre les deux extrémités du fil, pendant le déplacement de la bobine dans le champ magnétique, une différence de potentiel de E volts (**). — On démontrerait, en raisonnant comme dans le cas d'une pile en circuit ouvert (751), que le nombre E est égal au nombre $\frac{W_1}{0}$, qui exprime, en joules, l'énergie communiquée à chaque coulomb mis en mouvement quand le circuit est fermé.

869. Effets de la self-induction sur l'intensité du courant d'une pile, au moment de la fermeture ou de la rupture du circuit. — Au moment de la *fermeture* du circuit d'une pile, la self-induction donnant naissance à un courant de sens contraire à celui de la pile (866), on doit considérer les divers éléments du circuit comme étant le

(*) Cette proposition n'est plus rigoureusement exacte quand le courant induit n'est pas constant.

(**) On peut faire cette expérience avec le cerceau de Delezenne (*fig.* 658), en lui imprimant une demi-révolution.

siège d'une *force électromotrice de self-induction inverse*, qui s'oppose à l'établissement du courant principal. Il en résulte, pendant les premiers instants, une diminution de l'intensité de ce courant; en d'autres termes, le courant de la pile n'acquiert que graduellement son régime régulier. — Pour une pile de force électromotrice déterminée, et pour un circuit de résistance totale déterminée, la durée de cet accroissement progressif d'intensité sera d'autant plus grande que chacun des éléments du circuit aura dans son voisinage un plus grand nombre d'autres éléments.

Au moment de la *rupture* du circuit d'une pile, la self-induction donnant naissance à un courant de même sens que celui de la pile, on doit considérer les divers éléments du circuit comme étant le siège d'une *force électromotrice de self-induction directe*, qui peut acquérir une valeur considérable lorsque le circuit est replié plusieurs fois sur lui-même. — C'est ainsi que s'expliquent les effets suivants :

La rupture du circuit d'une pile formée d'une dizaine d'éléments de Bunsen, lorsque le conducteur interpolaire n'est pas replié sur lui-même, ne donne naissance qu'à une faible étincelle. Au contraire, si l'on interpose dans le circuit une bobine portant un fil enroulé un grand nombre de fois, *l'étincelle de rupture* éclate avec un bruit comparable à celui d'une capsule fulminante. Cependant la résistance introduite par la bobine ne peut que diminuer l'intensité du courant de la pile, à l'état permanent; l'effet qui se produit ici doit donc être attribué à la force électromotrice de self-induction directe, qui s'établit au moment de la rupture du circuit.

Lorsque le circuit d'une pile contient une bobine, et que, prenant dans les mains les deux extrémités du fil de cette bobine, on les détache vivement, de manière que la bobine forme alors avec le corps de l'opérateur un circuit fermé, on ressent une commotion violente. L'intensité de cette commotion est encore beaucoup augmentée, si l'on introduit dans la bobine un faisceau de fils de fer doux. C'est encore un effet de la force électromotrice de self-induction directe.

870. Comparaison des courants induits de fermeture et de rupture. — Lorsque, dans la disposition représentée par la figure 637, on ferme et on rompt alternativement le circuit inducteur VA, on observe, au galvanomètre G intercalé dans le circuit induit B, des déviations de l'aiguille *égales et contraires*. — Or, lorsqu'on fait passer dans un galvanomètre un courant dont la durée est assez petite pour que l'aiguille soit encore sensiblement au zéro à l'instant où le courant cesse, l'impulsion donnée à l'aiguille est à la fois proportionnelle à l'intensité i et à la durée θ de ce courant; c'est-à-dire que, dans ce cas, la déviation observée, au lieu de mesurer l'intensité i d'un courant *instantané*, mesure la quantité d'électricité $i\theta$, mise en mouvement pendant la durée très petite de ce courant. — Soient i et θ l'intensité

et la durée du courant de fermeture, i' et $0'$ l'intensité et la durée du courant de rupture. De l'égalité des deux déviations de l'aiguille, on doit conclure que les quantités d'électricité $i0$ et $i'0'$, mises en mouvement dans ces deux courants indnits, sont égales entre elles; c'est ce que l'on énonce souvent en disant que les deux courants induits, de fermeture et de rupture, sont *égaux en quantité*.

Mais ces deux courants induits *n'ont pas la même intensité*. — Pour le vérifier grossièrement, il suffit de faire communiquer les deux extrémités du fil induit avec deux poignées métalliques, que l'on tient dans les mains. On éprouve une commotion, soit à la fermeture du courant inducteur, soit à la rupture; mais la commotion la plus forte est toujours celle qui est produite par le courant de rupture. — C'est donc le courant *direct* qui a *la plus grande intensité*.

Il est d'ailleurs facile de concevoir qu'il en soit ainsi, d'après ce qu'on vient de voir des effets de la self-induction sur l'intensité du courant inducteur (869). Au moment de la fermeture, la self-induction inverse prolongeant l'intervalle de temps nécessaire pour que le courant inducteur atteigne son intensité régulière, la durée 0 du courant induit de fermeture doit être beaucoup plus grande que la durée $0'$ du courant induit de rupture; et puisque les quantités d'électricité mises en mouvement dans ces deux courants induits sont égales, l'intensité i' du courant induit de rupture doit être beaucoup plus grande que l'intensité i du courant induit de fermeture.

871. Effets de la self-induction, dans la décharge d'une bouteille de Leyde. — Lorsque, pour décharger une bouteille de Leyde électrisée, on met l'armature externe en communication avec l'une des extrémités d'un conducteur, et qu'on approche l'autre extrémité à une petite distance de l'armature interne, on peut obtenir, suivant les conditions de l'expérience, deux résultats très différents.

Si le conducteur est un fil métallique fin et long, *non replié* sur lui-même, de manière que les effets de self-induction soient très faibles, il se produit, de l'armature positive à l'armature négative de la bouteille, un courant dont l'intensité, d'abord nulle, passe par un maximum, pour redevenir nulle : on observe alors une seule étincelle, peu sonore. — Dans ce cas, la décharge est dite *continue*, et l'énergie préalable des conducteurs électrisés se retrouve presque tout entière, après cette étincelle unique, sous forme de chaleur dégagée dans le fil métallique.

Si, au contraire, le fil métallique est *enroulé plusieurs fois* sur lui-même, de manière à donner lieu à une self-induction intense, on constate, en observant le phénomène lumineux dans un miroir tournant, une série d'étincelles, de moins en moins brillantes, se succédant pendant la durée de la décharge. — On conçoit en effet que, dès qu'une première étincelle détermine un déplacement d'électricité positive, de l'armature positive à l'armature négative, le courant ainsi produit donne naissance, dans les replis du circuit, à une force électromotrice de self-induction inverse, fournissant une seconde étincelle en sens inverse de la première, et ainsi de suite. L'électricité oscille donc ainsi entre les deux armatures, jusqu'à ce que l'énergie accumulée dans

les conducteurs électrisés ait été dépensée, soit en chaleur dégagée dans le circuit, soit en vibrations sonores ou calorifiques dans l'étincelle complexe ainsi produite. — Cette forme de décharge est dite *décharge oscillante*.

II. — BOBINES D'INDUCTION.

872. Principe des bobines d'induction. — Nous appellerons spécialement *bobines d'induction* des appareils qui servent à obtenir, au moyen d'un courant *de grande intensité* et de force électromotrice relativement faible, un courant *de force électromotrice très grande*.

Une bobine d'induction se compose essentiellement d'une hélice inductrice A (*fig.* 637), contenant un noyau de fer doux D, et d'une hélice induite B. — Par des alternatives de fermeture et de rupture du courant inducteur A, on fait alternativement apparaître et disparaître un champ magnétique puissant dans le voisinage du circuit B. Tout se passe comme si, le champ magnétique demeurant invariable, on amenait brusquement le circuit induit B dans ce champ, pour l'en éloigner ensuite. — Pour obtenir une force électromotrice d'induction aussi considérable que possible, on devra, d'une part, faire en sorte que le champ magnétique soit puissant, c'est-à-dire que le courant inducteur ait une grande intensité; on devra, d'autre part, donner une grande longueur au fil qui constitue l'hélice B.

La première idée de cet appareil est due à Masson ; les détails de construction ont été réalisés par Ruhmkorff, vers 1851.

873. Bobine de Ruhmkorff. — Autour d'un faisceau de fils de fer doux, est enroulé un *gros fil* (de 2 à 5 millimètres de diamètre) formant seulement deux ou trois couches autour du fer doux : c'est ce fil, de faible résistance, qui constitue le circuit inducteur. Il est placé à l'intérieur d'un tube de verre, sur lequel est enroulé un grand nombre de fois un fil *très long et très fin*, qui constituera le circuit induit : dans les bobines de grandes dimensions, la longueur de ce fil peut atteindre 120 000 mètres ; son diamètre est d'environ un cinquième de millimètre. Le tout forme une grosse bobine S (*fig.* 642), terminée par deux disques de verre. On a représenté, sur la gauche, marqués des signes + et —, les conducteurs qui mettent la pile en communication avec le fil inducteur. Le courant arrive en R′ dans un *commutateur* (*fig.* 643) dont la position est supposée telle, que le courant passe en E et arrive au point I par une bande métallique fixée sur le socle de l'appareil. Le courant passe ensuite dans un *interrupteur*, qui est représenté à droite dans la figure 642 ; la figure 644 en indique les détails, à une échelle un peu plus grande. — L'interrupteur se compose d'un petit marteau dont la tête O, qui est en fer doux, est placée à une petite distance au-dessous de l'extrémité du faisceau de fils de fer qui forme le noyau de la bobine, et qui dépasse le disque de verre, comme

le montre la figure 642; le manche du marteau, qui est en cuivre, est articulé à la partie supérieure de la colonne métallique D (*fig.* 644); au-

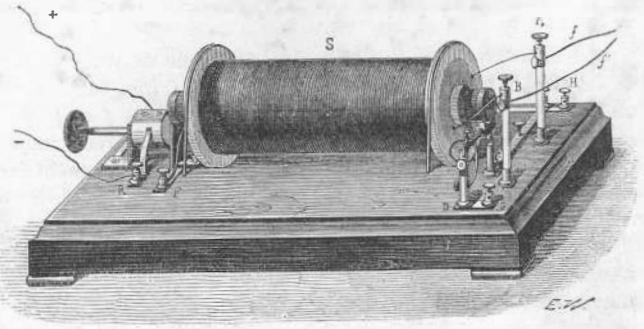


Fig. 642. — Bobine de Ruhmkorff.

dessous de la tête du marteau, est une sorte de petite enclume *e*, formée

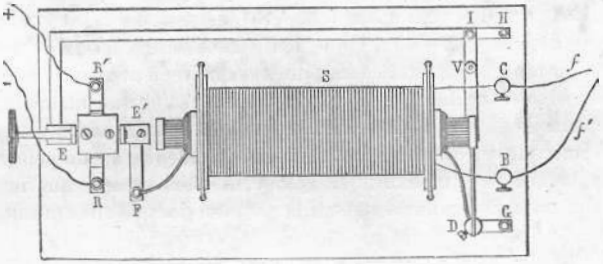


Fig. 643.

par un cylindre de cuivre vertical qui est supporté par une lame métallique. — Le courant, après avoir suivi l'enclume *e* et le marteau O, passe de D dans la bobine inductrice (*fig.* 643), sort par le fil qui aboutit à la borne F, et retourne à la pile après avoir traversé le commutateur.

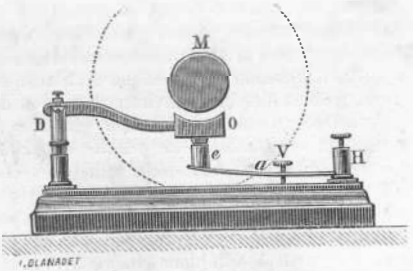


Fig. 644. — Interrupteur de la bobine de Ruhmkorff.

Voici maintenant comment fonctionne l'*interrupteur*. — Dès que, par le jeu du commutateur (note de la page 678), le courant inducteur est établi, le faisceau de fer s'aimante, attire la tête O du marteau, lui fait

abandonner l'enclume, et le circuit inducteur est interrompu : le faisceau de fils de fer n'étant plus aimanté, le marteau retombe par son poids, et le courant est rétabli. Ces alternatives se reproduisent indéfiniment.

Les extrémités du fil induit traversent le disque de verre de droite, et viennent aboutir aux bornes métalliques B et C (*fig.* 642). — Si l'on ferme le circuit induit, en réunissant les deux fils *f* et *f'* par un conducteur, chaque *fermeture* et chaque *rupture* du circuit inducteur détermine la production d'un courant induit, alternativement *inverse* et *direct*. Ces deux courants sont égaux en *quantité*, mais le courant direct a une intensité beaucoup plus grande que le courant inverse (870). — Si les deux fils *f* et *f'* sont éloignés l'un de l'autre, chacun d'eux est alternativement porté à un potentiel positif et négatif; au même instant, les potentiels des deux fils sont de signes contraires, et la différence de ces deux potentiels est égale à la force électromotrice d'induction.

Lorsqu'on rapproche suffisamment les extrémités des fils *f* et *f'*, on peut faire éclater entre eux une série continue d'étincelles, dont la longueur peut atteindre jusqu'à 50 centimètres, pour les bobines de grandes dimensions. — Tant que la distance entre les fils *f* et *f'* est un peu grande, les étincelles sont dues exclusivement au courant *direct*, et coïncident avec la *rupture* du circuit inducteur; au moment de la fermeture, la force électromotrice du courant induit inverse est insuffisante pour que l'électricité franchisse une épaisseur d'air un peu grande. — La bobine de Ruhmkorff se comporte alors comme une machine de Holtz ou de Wimshurst : selon la position donnée au commutateur, c'est le fil *f* ou le fil *f'* qui joue le rôle de pôle positif(*).

874. Condensateur de M. Fizeau. — Quand on fait fonctionner la bobine d'induction telle que nous venons de la décrire, chaque fois que le marteau se relève, on voit éclater une étincelle *entre le marteau et l'enclume*. Or, il y évidemment intérêt à diminuer, autant que possible, la durée de cette étincelle, afin de rendre plus rapide l'interruption du courant inducteur, et d'augmenter ainsi la force électromotrice du courant induit direct. Tel est le but de la disposition imaginée par M. Fizeau en 1853.

Deux feuilles d'étain, d'environ 4 mètres de longueur, séparées par une feuille isolante de taffetas ciré, sont plusieurs fois repliées sur elles-mêmes, et forment un *condensateur de grande capacité*, qui est logé dans le socle de l'appareil (*fig.* 642), Les deux armatures communiquent, la première avec l'extrémité F du fil inducteur, la seconde avec l'extrémité D. — Supposons toujours que le courant aille dans la bobine suivant DF (*fig.* 645) : au moment de l'interruption, l'extra-courant *direct* de rupture (866) mettant l'électricité positive en mouvement dans chaque spire, suivant la direction générale DF,

(*) Avec une bobine de grandes dimensions, on charge rapidement, en quelques secondes, une batterie de grande capacité : on relie les deux pôles *f* et *f'* aux deux armatures de la batterie, en ayant soin de ménager, sur l'un des fils de communication, une distance explosive suffisante pour intercepter le courant inverse.

les électricités positive et négative vont s'accumuler respectivement dans les deux armatures du condensateur. La plus grande partiede l'extra-courant est alors employée à charger le condensateur; une faible fraction seulement de ce courant passe de F en E', en R, à travers la pile, en R', E, H et D, et franchit, sous la forme d'une *très courte étincelle*, l'intervalle d'air qu existe entre l'enclume et le marteau : l'interruption du courant inducteur est donc presque instantanée.

Quand la *force électromotrice* de l'extra-courant n'agit plus, les électricités contraires, réparties sur les deux armatures, se recombinent à travers le fil inducteur, en donnant un courant dont le sens général est FD; ce courant *secondaire* a pour effet de désaimanter instantanément le faisceau de fils de fer doux, et de supprimer le magnétisme rémanent. — Le condensateur de M. Fizeau rend donc plus rapides et plus régulières les oscillations de l'interrupteur.

875. Interrupteur de Foucault. — L'interrupteur à marteau (*fig.* 644 ne peut pas être employé avec les bobines de grandes dimensions, actionnées par des courants inducteurs intenses; malgré l'emploi du condensateur de M. Fizeau, l'étincelle de rupture produirait un arrachement des particules métalliques : bien que les surfaces de l'enclume et du marteau soient garnies de platine, elles seraient rapidement détériorées. — On emploie alors l'*interrupteur de Foucault* (*fig.* 645).

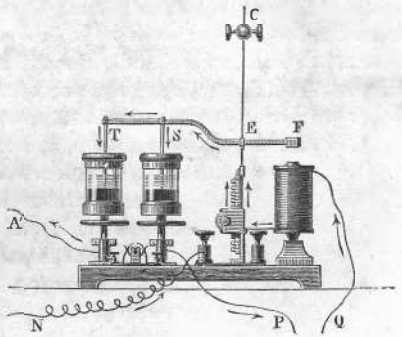


Fig. 645. — Interrupteur de Foucault.

Deux pointes de platine verticales, T, S, sont fixées vers l'une des extrémités du levier TF, qui est supporté en E par une lame élastique verticale : ces deux pointes pénètrent dans deux godets qui contiennent du mercure, couvert d'une couche d'alcool. A l'autre extrémité du levier est une armature de fer F, placée à une petite distance d'un électro-aimant. Le fil de cet électro-aimant communique, par l'une de ses extrémités Q, avec le pôle positif d'une pile spéciale, formée d'un ou deux éléments de Bunsen; par son autre extrémité, avec la pointe S, par l'intermédiaire de la lame élastique qui porte le levier; le godet S communique, par le fil P avec le pôle négatif de la même pile. Le godet T et le levier lui-même sont introduits dans le circuit *inducteur* de la bobine de Ruhmkorff, par les fils A et N. — Dès que le circuit de la pile spéciale de l'interrupteur est fermé, l'armature F est attirée par l'électro-aimant, en sorte que l'extrémité T du levier, en se relevant, fait sortir du mercure les deux pointes, et interrompt les deux circuits; mais, l'électro-aimant ayant alors perdu son aimantation, le levier est ramené en sens contraire par l'élasticité de la lame qui le supporte : les deux circuits sont de nouveau fermés, et ainsi de suite. — L'alcool étant très mauvais conducteur, l'interruption du circuit inducteur est instantanée, et par suite l'intensité des courants induits est aussi grande que possible.

876. Fractionnement de la bobine induite. — Supposons que l'on fasse fonctionner la bobine d'induction sans réunir les extrémités des fils f et f'; De l'extrémité f à l'extrémité f', le potentiel varie progressivement avec la

longueur de fil parcourue; par suite, en deux points contigus appartenant à deux spires superposées, prises au milieu de la bobine, la différence de potentiel dépend de la longueur de fil parcourue par le courant, pour aller d'un de ces points à l'autre; cette longueur devient très grande pour une bobine de grandes dimensions, formée d'un fil très fin; alors, si l'intensité du courant inducteur dépasse une certaine limite, il peut arriver qu'une décharge se produise entre ces deux points, et perce la couche isolante. — Pour atténuer cette cause de détérioration, Poggendorff a proposé d'enrouler le fil de manière à constituer un certain nombre de bobines partielles, quatre par exemple, disposées sur le même axe. On peut alors employer un courant inducteur d'une intensité quatre fois plus grande, sans courir de plus grandes chances de rupture.

877. Usages de la bobine d'induction. — Effluve électrique. — Les bobines d'induction de petites dimensions sont employées dans les laboratoires, pour produire une série continue d'étincelles, par exemple pour décomposer le gaz ammoniac (*fig.* 497). — On se sert également de la bobine de Ruhmkorff pour faire jaillir à grande distance une étincelle, à un instant donné, et déterminer ainsi l'inflammation d'une substance explosive : poudre, fulmicoton, etc.

C'est avec la bobine d'induction qu'on obtient l'*effluve électrique*. — Pour produire l'effluve à travers un gaz tel que l'oxygène, on emploie un appareil dû à M. Berthelot (*fig.* 646). Dans l'espace annulaire que laissent entre eux deux tubes de verre concentriques h et k, soudés l'un à l'autre en e, on fait passer lentement un courant d'oxygène : le gaz entre par le tube b, et sort par le tube a. Les deux pôles de la bobine d'induction communiquent, par des fils de platine f, f', avec deux masses d'eau acidulée, cc', dd', contenues, l'une dans le tube h, l'autre dans l'éprouvette à pied V. — Quand la bobine fonctionne, la couche d'eau acidulée qui est au contact de la paroi intérieure du tube h, et celle qui est au contact de la paroi extérieure du tube k, sont chargées d'électricités contraires ; mais, selon que le courant induit est direct ou inverse, chacune de ces électrodes est alternativement positive et négative. Il se produit donc, dans l'espace annulaire, un champ électrique dans lequel la force électrique change de sens à chaque fermeture et à chaque rupture du circuit inducteur. Or, si l'on considère deux éléments de la surface du verre, situés vis-à-vis l'un de l'autre, leurs électricités contraires, préalablement combinées à l'état neutre, doivent se séparer, l'électricité positive se portant dans le sens de la force électrique, l'électricité négative en

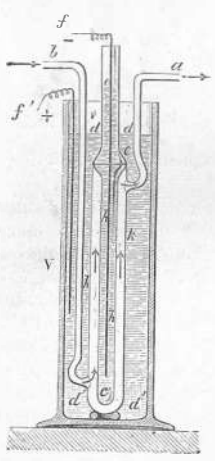


Fig. 646.
Effluve à travers un gaz.

sens inverse. A chaque changement de sens de la force électrique, les deux électricités se transportent d'une surface à l'autre sous forme d'une très petite étincelle. Il en est de même pour les divers points de la surface de chaque électrode, et l'on obtient ainsi une infinité de très petites étincelles. — Quand on fait l'expérience dans l'obscurité, on observe une lueur continue, dans tout l'espace compris entre les deux tubes *h* et *k*.

Lorsque l'oxygène a été soumis à l'action de l'effluve, on constate qu'une partie plus ou moins considérable du gaz s'est transformée en *ozone*.

878. Tubes de Geissler. — Tubes de Crookes. — Quand les deux extrémités du fil induit d'une bobine de Ruhmkorff sont en communication avec deux conducteurs placés dans un espace contenant un gaz raréfié, on observe, à chaque décharge, des lueurs qui remplissent une partie de cet espace. Si la raréfaction est poussée suffisamment loin, il se produit, entre les extrémités des conducteurs, une succession de couches alternativement brillantes et obscures, qui ont reçu le nom de *stratifications*.

C'est ce qu'on observe dans les *tubes de Geissler* (*fig.* 647). — Le fil A, qui communique avec l'extrémité *positive* du fil induit (pour les courants *directs*), présente, à son extrémité, un point très brillant ; on observe des stratifications dans toute l'étendue du tube large qui contient ce fil. Le fil B, qui communique avec le conducteur négatif, est entouré d'une gaine lumineuse, et les stratifications s'arrêtent à une certaine distance de son extrémité. La partie étroite C n'offre généralement pas de stratifications, mais une lumière vive, dont la couleur dépend de la nature du gaz contenu dans l'appareil. — Ces tubes sont particulièrement employés pour les études spectrales (*).

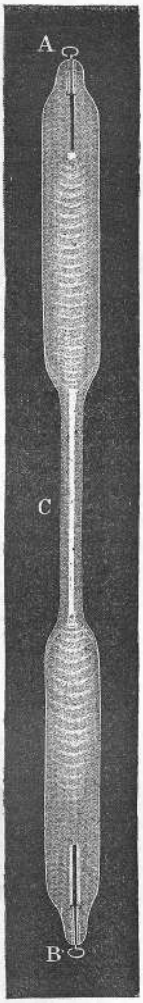


Fig. 647
Tube de Geissler

Dans les *tubes de Crookes*, la raréfaction est poussée plus loin encore, jusqu'à ce que la pression du gaz soit inférieure à quelques millionièmes d'atmosphère. Quand on y fait passer la décharge de la bobine d'induction, on n'observe plus aucune lueur entre les deux électrodes,

(*) Certains tubes de Geissler présentent des parties formées de différents verres, qui acquièrent, par *fluorescence*, des teintes diverses au moment du passage du courant On obtient ainsi des effets lumineux d'une grande beauté.

mais le tube de verre devient fluorescent. Tout se passe alors comme si les molécules du gaz, après s'être électrisées au contact de l'une des électrodes, étaient lancées normalement à la surface; ce serait le choc des molécules gazeuses sur le verre qui déterminerait la fluorescence. — Le phénomène est surtout brillant dans la région du tube qui est opposée à l'électrode négative. Dans l'appareil représenté par la figure 648, l'électrode négative *a* a la forme d'un petit miroir convexe; l'électrode positive est une lame d'aluminium *b*, taillée en forme de croix. Au moment de la décharge, la lame *b* semble arrêter les molécules lancés par *a* normalement à sa surface, en sorte que l'ombre de la croix se projette en *c*, sur la surface du tube illuminé.

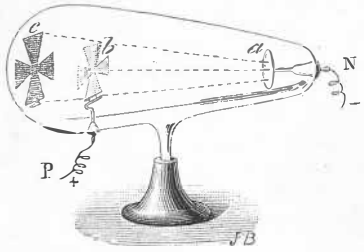


Fig. 648.

879. Production de courants alternatifs de grande fréquence et de grande force électromotrice. — Expériences de M. Elihu Thompson et de M. Tesla. — Quand un circuit est parcouru par des courants alternativement de sens contraire, on appelle *fréquence*, le nombre des courants, de même sens ou de sens contraire, qui se succèdent pendant une seconde. Ainsi, quand le circuit induit d'une bobine de Ruhmkorff est fermé, la fré-

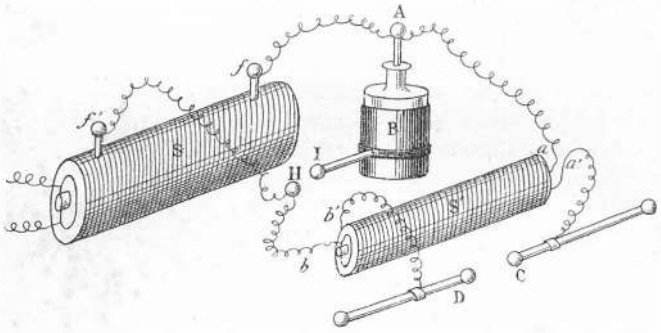


Fig. 649.

quence des courants alternatifs est mesurée par le nombre des interruptions du circuit inducteur, en une seconde; dans ce cas, la fréquence ne peut pas dépasser quelques unités.

Le dispositif suivant, qui a été indiqué par M. Elihu Thomson, permet de transformer un courant continu en courants alternatifs de très grande fréquence, et de force électromotrice beaucoup plus grande que celle des courants de la bobine de Ruhmkorff. — Une bobine d'induction S (*fig.* 649) est actionnée par le courant d'une pile; les extrémités *f* et *f'* du fil induit commu-

niquent avec les armatures A et B d'une bouteille de Leyde ; on a ménagé en IH une distance explosive, pour intercepter le courant inverse, en sorte que, à chaque interruption du courant inducteur dans la bobine S, la bouteille se charge, les deux armatures A et B acquérant une différence de potentiels égale à la force électromotrice du courant induit direct fourni par la bobine S. Dès que cette force électromotrice a cessé d'agir, la bouteille tend à se décharger par le circuit A*ab*IIB, qui contient un gros fil *ab* faisant une dizaine de tours sur un faisceau de fils de fer doux. Dans ces conditions, la décharge est oscillante (871); le circuit *ab* est parcouru par des courants alternatifs, dont la force électromotrice est considérable et dont la fréquence est très grande : le nombre des oscillations électriques de la décharge est compris entre 10 000 et 100 000 par seconde. — La bobine constituée par l'enroulement du gros fil *ab* est enfermée dans un tube d'ébonite, et, sur ce tube, s'enroule un fil très fin et très long *a'b'*, dont les extrémités aboutissent aux deux conducteurs métalliques isolés C et D. La bobine S' ainsi formée est immergée dans une cuve d'huile, afin d'isoler parfaitement les différentes spires les unes des autres. — Les courants alternatifs qui se succèdent dans le circuit primaire *ab* donnent naissance, dans le circuit secondaire *a'b'*, à des courants induits alternatifs, dont la force électromotrice est beaucoup plus grande que celle des courants inducteurs : un conducteur réunissant C et D est ainsi parcouru par des courants alternatifs, dont la fréquence varie entre 10000 et 100000, et dont la force électromotrice peut atteindre plusieurs milliers de volts.

M. Tesla a même obtenu des courants alternatifs dont la fréquence peut atteindre 400 000, et dont la force électromotrice est voisine de $\frac{1}{2}$ million de volts, en substituant dans le dispositif précédent, à la bobine de Ruhmkorff S, actionnée par un courant continu, une bobine analogue à la bobine S', actionnée elle-même par des courants alternatifs produits par une machine dynamo-électrique.

Les courants alternatifs obtenus par l'un ou l'autre de ces dispositifs se prêtent à des expériences très curieuses :

1° Si on met les mains en communication avec les bornes C et D de la bobine S', par l'intermédiaire de pièces métalliques, afin d'éviter les brûlures de l'étincelle, on peut supporter le courant sans éprouver aucune douleur, bien que la différence des potentiels aux bornes dépasse 50 000 volts. Des courants de même intensité, mais de plus faible fréquence, seraient foudroyants (*).

2° Quant on écarte les conducteurs C et D, on obtient de très longues étincelles. Si l'on adapte en C et en D deux plateaux verticaux, et qu'on les éloigne l'un de l'autre, de manière que l'étincelle ne jaillisse plus, il se produit entre eux un champ électrique dans lequel le sens des lignes de force est rapidement interverti : si l'on place entre ces deux plateaux, dans la direction des lignes de force, un tube de verre fluorescent, contenant un gaz raréfié, le tube s'illumine. Le phénomène est beaucoup moins brillant quand le tube est disposé perpendiculairement aux lignes de force.

3° Si, mettant l'une des bornes D à la terre, on fait communiquer l'autre borne C avec un globe de verre contenant un gaz raréfié et muni d'une seule

(*) D'après M. d'Arsonval, les nerfs sensitifs ou moteurs ne seraient plus excitables quand la fréquence des oscillations électriques dépasse 30 000. — On sait, du reste, que les nerfs auditifs ne sont pas excités, quand la fréquence des oscillations sonores dépasse 20 000 (433); que les nerfs optiques ne sont sensibles qu'à des oscillations de l'éther dont la fréquence est comprise entre 400 trillions (rayons rouges), et 700 trillions (rayons violets) (545).

électrode, formée d'un gros bouton métallique, le bouton s'illumine ; le verre, devenu fluorescent, s'échauffe en raison des chocs répétés des molécules gazeuses. L'éclat du phénomène augmente, quand on approche du globe la main ou tout autre conducteur.

III. — TÉLÉPHONE ET MICROPHONE.

880. Téléphone de Bell. — L'une des applications les plus remarquables des courants d'induction est le *téléphone*, qui permet de transmettre des sons ou la parole à de grandes distances.

Le téléphone, imaginé en Amérique par M. Bell, se compose d'une plaque mince de fer M (*fig.* 650), placée au fond d'une embouchure E,

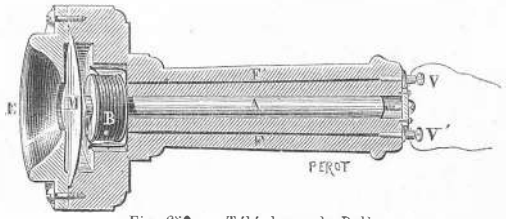


Fig. 650. — Téléphone de Bell.

et derrière laquelle est fixée une tige d'acier aimantée A. Sur cette tige est assujettie une bobine B, sur laquelle est enroulé un fil métallique couvert de soie : les deux extrémités de ce fil, F, F' viennent aboutir à deux bornes métalliques V, V', fixées à l'étui de bois qui contient tout l'instrument. — Dans ces bornes, on assujettit des fils conducteurs, se rendant à un appareil identique, placé au point où se trouve la personne avec laquelle on doit entrer en conversation. Nous supposerons que les pièces de ce second appareil soient désignées par les mêmes lettres, affectées de l'indice 1.

Celui des deux interlocuteurs qui prend le premier la parole approche de sa bouche l'embouchure E de l'appareil qu'il tient à la main, et qui va jouer le rôle de *transmetteur* de la voix. L'autre personne applique contre son oreille l'embouchure E_1 de l'autre appareil, qui va jouer le rôle de *récepteur*. — Les impulsions communiquées par la voix, à la petite plaque de fer M du *transmetteur*, déterminent une succession de rapprochements et d'éloignements alternatifs de cette plaque par rapport à l'aimant. A chaque rapprochement, il y a accroissement du magnétisme développé par influence dans la plaque, et par réaction, accroissement du magnétisme de l'aimant A lui-même : par suite, production d'un courant électrique *induit*, dans le fil de la bobine B. A chaque éloignement, il se produit encore un courant induit, de sens contraire au premier, et ainsi de suite. — Ces courants, en traversant

la bobine B_1 du *récepteur*, augmentent ou diminuent alternativement le magnétisme de son aimant A_1 : ils ont donc pour effet de déterminer des rapprochements ou des éloignements alternatifs de la plaque de fer M_1 par rapport à cet aimant, en sorte que les mouvements de cette plaque reproduisent ceux de la plaque du transmetteur. L'air de l'embouchure E_1 est ainsi mis en vibration, et communique le son à l'oreille de celui qui écoute.

Chacun des deux appareils peut fonctionner alternativement comme *transmetteur* ou comme *récepteur*.

881. Combinaison du téléphone et du microphone. — Dans la disposition précédente, les courants induits étant très faibles, le son est toujours peu intense au point d'arrivée. — L'invention du *microphone*, qui est due encore à un physicien américain, M. Hughes, a fait faire à la question un progrès considérable. Voici la disposition, d'une simplicité remarquable, qu'il a d'abord imaginée.

Deux petites pièces de charbon conducteur sont fixées en C et C′ sur une planche de bois MN (*fig.* 651) ; entre elles, est placée une sorte de crayon de charbon A, dont les deux pointes sont reçues dans de petites cavités, de manière qu'il appuie légèrement sur chacune d'elles. On fait passer dans l'appareil le *courant d'une pile*, dont le circuit est mis en communication avec la bobine d'un téléphone, placé à une grande distance. — C'est la succession des pièces de charbon qui constitue le *microphone*. Le microphone va jouer le rôle de *transmetteur ;* le téléphone fonctionnera ici exclusivement comme *récepteur*.

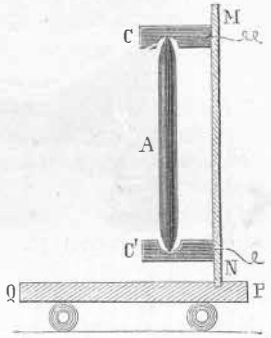


Fig. 651.
Microphone de Hughes.

Dès qu'on produit un son dans le voisinage du microphone, les vibrations sonores suffisent pour modifier les contacts du crayon A avec ses supports, et pour faire subir, au courant de la pile, des variations qui modifient le magnétisme de l'aimant du téléphone, et qui mettent ainsi sa plaque de fer en mouvement.

882. Système Ader. — Un très grand nombre de modifications ont été apportées, soit au microphone transmetteur, soit au téléphone récepteur.

Dans le système qui a été imaginé par M. Ader, et qui a été adopté en France par la Société des Téléphones, le microphone transmetteur est fixé sous une plaque de bois mince, disposée comme la table d'un petit pupitre (*fig.* 652), et devant laquelle on se place pour émettre la voix. — Il se compose d'une série de petites baguettes de charbon, assujetties à peu près comme dans le microphone de Hughes, de ma-

nière que les contacts de ces baguettes avec leurs supports soient modifiés par les vibrations imprimées à la plaque de bois. Il se produit ainsi, dans le courant de la pile qui est mise en communication avec le système, des variations d'intensité, qui s'accusent par des mouvements imprimés à la plaque de fer de chaque téléphone, au poste d'arrivée.

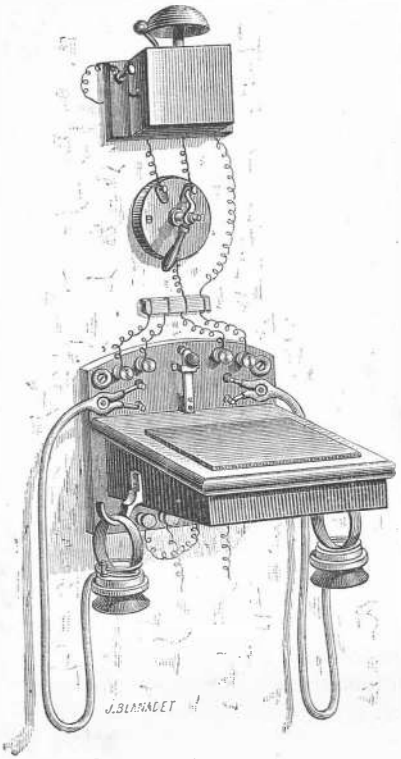


Fig. 652. — Système Ader.

Quant aux téléphones récepteurs, que la figure 652 représente suspendus par des anneaux, de chaque côté du transmetteur, leur disposition diffère un peu de celle du téléphone de Bell. L'aimant est un petit aimant en fer à cheval, fixé à l'intérieur du disque de caoutchouc durci qui forme la base de l'embouchure. Dans la même monture, en regard de chacun des pôles de l'aimant, se trouve une petite bobine de fils conducteurs, que traverse le courant : on a ainsi l'avantage de soumettre la plaque de fer à l'action des deux pôles à la fois, ce qui donne aux sons produits plus d'intensité.

Enfin chaque poste présente diverses pièces accessoires, semblables à celles qui sont en usage sur les lignes télégraphiques, et destinées à faciliter le service. La figure 652 représente, à la partie supérieure, une sonnerie qui sert d'avertisseur ; au-dessous, est un commutateur, que l'on tourne de manière à recevoir le courant dans les fils des téléphones, quand on est prêt à entrer en correspondance (*).

(*) Le transmetteur et le récepteur doivent communiquer par deux fils, un fil *d'aller* et un fil de *retour* ; les fils en bronze silicieux sont ceux qui paraissent le plus avantageux. — Quand la ligne est aérienne, on trouve parfois économie à profiter, pour la soutenir, des poteaux établis pour les lignes télégraphiques ; mais il faut alors croiser les fils téléphoniques, de façon que les courants télégraphiques ne puissent pas y faire naître de courants induits, qui troubleraient la correspondance.

IV. — MACHINES MAGNÉTO-ÉLECTRIQUES ET DYNAMO-ÉLECTRIQUES.

883. Machines d'induction, en général, transformant l'énergie mécanique en énergie électrique, sous forme de courants. — Nous appellerons *machines d'induction*, en général, les machines au moyen desquelles, une portion de circuit fermé étant mise en mouvement dans un champ magnétique, l'énergie mécanique employée à produire ce mouvement est transformée en énergie électrique, sous forme de courants d'induction, dans ce circuit lui-même. — Une machine d'induction comprend essentiellement :

1° Un système *inducteur*, constitué par des aimants ou des électro-aimants, généralement fixes, qui produisent un champ électrique intense dans le voisinage de leurs régions polaires. — Suivant que ce système est formé d'aimants ou d'électro-aimants, la machine est dite *magnéto-électrique* ou *dynamo-électrique*.

2° Un système *induit*, placé dans le champ magnétique créé par le système inducteur, et constitué par des conducteurs qui sont le plus souvent disposés symétriquement par rapport à un axe de rotation : chacun de ces conducteurs est relié avec les deux extrémités d'un circuit extérieur à la machine. — Pendant la rotation, les courants induits qui se développent au même instant dans les divers conducteurs s'additionnent dans le circuit extérieur.

Nous verrons que, suivant le dispositif employé, on peut faire en sorte que le sens du courant, dans la partie extérieure du circuit, reste constant, ou change périodiquement. — Dans le premier cas, la machine est dite *à courants continus* ; dans le second cas, la machine est *à courants alternatifs*.

884. Machine magnéto-électrique à courant constant : disque de Faraday. — Le dispositif suivant, qui est dû à Faraday, peut être considéré comme le type d'une machine magnéto-électrique produisant un courant d'intensité constante.

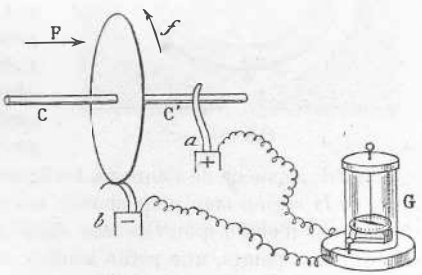


Fig. 653. — Disque de Faraday.

Un disque de cuivre mobile autour d'un axe métallique CC' (*fig.* 653) est placé dans un champ magnétique, de façon que son plan soit perpendiculaire aux lignes de force F du champ ; deux ressorts *a*, *b* frottent, l'un sur

l'axe, l'autre sur le contour du disque, et sont reliés par un fil conducteur dans lequel est intercalé un galvanomètre G. Si l'on imprime au disque un mouvement de rotation uniforme, dans le sens de la flèche *f*, on observe au galvanomètre une déviation constante : le sens de la déviation montre que, dans tous les rayons du disque dont les extrémités viennent successivement frotter sur le ressort *b*, il se développe un courant induit ascendant (*). Ce résultat est conforme à la loi de Lenz (867).

L'appareil se comporte donc comme une pile, dont les ressorts *a* et *b* seraient les pôles positif et négatif. — La force électromotrice E du courant sera proportionnelle à la vitesse de rotation et à l'intensité du champ magnétique. Si R est la résistance totale du circuit, on aura pour l'intensité du courant, $i = \frac{E}{R}$.

885. Machine magnéto-électrique de Gramme, à courants continus. — Le disque de Faraday ne fournit que des courants très faibles : ce n'est, à proprement parler, qu'une machine de démonstration. — Parmi les machines d'induction qui fournissent des courants réellement utilisables, il en est un certain nombre, les *machines de Gramme*, magnéto-électriques ou dynamo-électriques, dont le fonctionnement repose sur un même principe. Nous étudierons d'abord la machine *magnéto-électrique, à courants continus.*

Un anneau circulaire de fer doux *mn* (*fig.* 654) est placé entre les deux pièces polaires australe et boréale A et B d'un puissant aimant en fer à cheval. Il se développe, par influence, sur la surface extérieure de l'anneau, deux couches de magnétisme : l'une australe, *man*, vis-à-vis de B ; l'autre boréale, *mbn*, vis-à-vis de A. Ces deux couches sont séparées par une ligne neutre *mn*. A droite de l'anneau, les lignes de force du champ magnétique sont dirigées des divers points de A aux divers points de la région *mbn* ; à gauche de l'anneau, les lignes de force partent des divers points de la région *man* pour aboutir aux divers points de B.

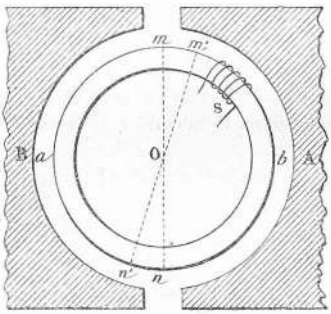


Fig. 654.

Concevons d'abord que, *l'anneau étant fixe*, on ait enroulé, autour de l'un de ses points, une petite hélice *s*, formée par un fil métallique

(*) Cette expérience peut être réalisée au moyen de la roue de Barlow (*fig.* 599), placée entre les branches de l'aimant en fer à cheval AB. — Il suffit de relier les deux fils P et N aux bornes d'un galvanomètre, et d'imprimer à la roue, au moyen d'une manivelle, un mouvement de rotation uniforme.

couvert de soie, et dont les extrémités seront supposées réunies par un conducteur fermant le circuit. — Si l'on déplace l'hélice sur l'anneau, d'une manière continue, dans le sens *mbnam*, il se produira une succession de courants induits, qui changeront alternativement de sens à chaque demi-révolution *mbn*, *nam*. — En effet, pendant le déplacement *mbn*, puisque l'action du champ magnétique sur le courant induit, dirigée vers la droite de ce courant (850), doit contrarier le mouvement de l'hélice (867), c'est vers le haut de la figure que doit être la droite d'un observateur placé dans le courant, et regardant du côté de A, d'où viennent les lignes de force magnétique : en d'autres termes, le courant induit doit traverser le plan de la figure d'*avant en arrière*, en dehors de l'anneau. On verrait de même que, pendant la demi-révolution *nam*, le courant induit qui se développe dans l'hélice doit traverser le plan de la figure d'*arrière en avant*, en dehors de l'anneau. — S'il ne se produisait aucun effet de self-induction, le courant s'annulerait dans l'hélice aux instants où elle passerait en *m* ou en *n*, dans la ligne neutre de l'aimant. En réalité, la self-induction ayant pour effet de prolonger le courant qui finit et de contrarier le courant qui commence (869), le courant ne s'annule dans l'hélice que lorsqu'elle arrive en des points *m'*, *n'*, placés respectivement un peu au delà de *m* et *n*, dans le sens de la rotation; l'angle α que fait la ligne *m'n'* avec la ligne neutre *mn* est d'autant plus grand que la vitesse de rotation est plus grande; il est toujours inférieur à 90°.

Enfin, les phénomènes resteront encore les mêmes si, *l'hélice étant fixée à l'anneau*, on imprime *à l'anneau* un mouvement de rotation autour de son axe O : dans ce cas en effet, en raison de la facilité avec laquelle l'anneau s'aimante et se désaimante, les deux régions australe et boréale, *man*, *mbn*, occuperont toujours une position fixe dans l'espace. C'est ce mouvement, plus facile à réaliser, qui est adopté dans la machine de Gramme (*).

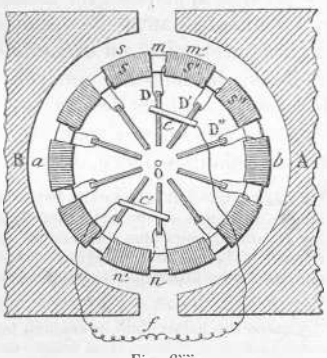


Fig. 655.
Anneau de la machine de Gramme.

Fixons maintenant sur l'anneau, non plus une seule hélice, mais

(*) La rotation d'un anneau massif de fer doux, dans le champ des pièces polaires A,B, donnerait naissance à des courants induits, circulant dans cette masse métallique (expérience de Foucault, *fig.* 641) ; il en résulterait un échauffement considérable de l'anneau et des fils des hélices. On évite cet inconvénient en employant un faisceau de fils de fer doux, soudés en anneaux et juxtaposés.

une série d'hélices, comme le représente la figure 655 : soudons à une pièce de cuivre D l'extrémité terminale de l'hélice *s* et l'extrémité initiale de l'hélice suivante *s'* : à une autre pièce de cuivre D', l'extrémité terminale de l'hélice *s'*, et l'extrémité initiale de l'hélice suivante *s''*, et ainsi de suite, le système de ces pièces de cuivre rayonnantes étant d'ailleurs assujetti à l'anneau, de manière à tourner avec lui autour de l'axe O. Disposons enfin, perpendiculairement au diamètre *m'n'*, deux ressorts métalliques *c*, *c'*, ou plutôt deux balais formés de fils métalliques flexibles, réunis par un fil conducteur (*). On voit que, à chaque période de la rotation, les deux systèmes d'hélices situés, l'un à droite et l'autre à gauche de *m'n'*, pourront être assimilés à deux systèmes d'éléments de piles, associés en série, chacune des séries ayant son pôle positif à l'un des balais *c*, son pôle négatif à l'autre balai *c'*. Les balais étant assez flexibles pour toucher simultanément plusieurs pièces de cuivre voisines, le courant, dans le conducteur *f*, ne sera jamais interrompu. — C'est ce qu'on exprime en disant que la machine est à *courants continus* (**).

La figure 656 représente un petit modèle de la machine de Gramme, construit par M. Bréguet pour les expériences de laboratoire ou de cours. — L'aimant LL' est un aimant du système Jamin (746) : entre les armures A et B, tourne l'anneau *mbn* ; on a représenté, avec des teintes alternativement plus claires et plus foncées, les hélices successives qui sont appliquées sur l'anneau de fer doux. Les pièces de cuivre rayonnantes, auxquelles sont soudées les extrémités des fils des hélices, se prolongent en avant de l'anneau, de manière à former un cylindre *k*, de diamètre plus petit : elles sont séparées les unes des autres par des rubans de soie, ou de toute autre matière isolante. Sur ce cylindre *k* viennent s'appuyer deux balais de fils métalliques, assujettis aux colonnes fixes *g*, *h*, qui reçoivent les fils *f* et *f'* et permettent

(*) L'angle α que fait la ligne des balais *c*,*c'* avec la ligne neutre *mn* s'appelle *angle de calage*. Pour une même machine, cet angle doit être d'autant plus grand que la vitesse de rotation sera plus considérable et que la résistance du circuit extérieur sera plus petite. — Si l'angle de calage n'est pas bien réglé, on s'en aperçoit à ce qu'il se produit de fortes étincelles, entre les balais et les pièces de cuivre qui passent au contact.

(**) Chacun des balais étant en contact, tantôt avec une seule pièce de cuivre D, tantôt avec deux pièces de cuivre, il en résulte de petites variations dans l'intensité du courant. — Ces variations deviennent négligeables, quand le nombre des hélices enroulées sur l'anneau est assez considérable.

Quant à la valeur de l'intensité du courant, il ne suffit pas, pour l'obtenir en ampères, de faire le quotient de la force électromotrice E, exprimée en volts, par la résistance R du circuit, exprimée en ohms. Une théorie complète montre que la self-induction, qui se produit dans chaque hélice quand un courant induit finit et quand l'autre commence, n'a pas seulement pour effet de retarder l'instant où le courant s'annule elle a aussi pour effet d'accroître la résistance du circuit, et de lui donner une valeur R', la *résistance apparente*, plus grande que la résistance vraie R, et d'autant plus grande que la self-induction est plus accentuée et que la vitesse de rotation est plus considérable.

de faire passer le courant dans un appareil quelconque. — Le mouvement est imprimé à l'anneau au moyen d'une manivelle et d'une roue

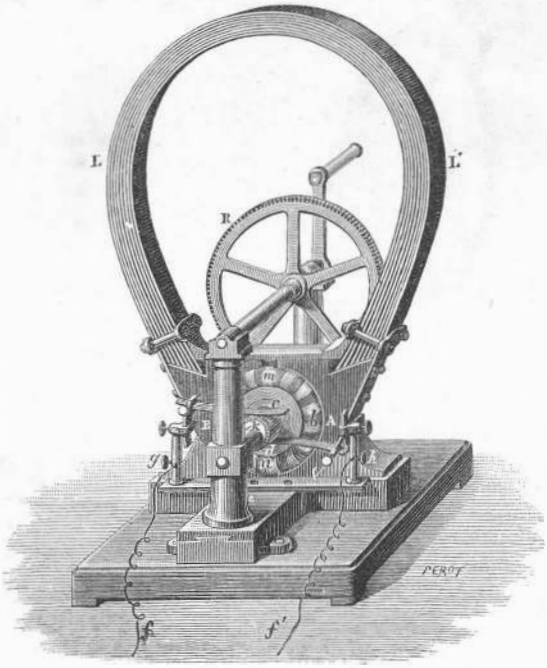


Fig. 656. — Machine de Gramme, type de laboratoire.

dentée R, qui engrène avec un pignon fixé à l'anneau (ce pignon est masqué sur la figure). On obtient facilement ainsi une vitesse de plusieurs centaines de tours par minute. — Avec cet appareil, on peut amener à l'incandescence un fil métallique de plusieurs décimètres de long, et réaliser la plupart des expériences qui exigeraient l'emploi d'une dizaine d'éléments de Bunsen.

886. Machine magnéto-électrique de Clarke, à courants alternatifs. — La machine de Clarke, dont la construction est bien antérieure à celle de la machine de Gramme, n'a plus guère aujourd'hui qu'une importance historique (*).

L'inducteur est formé de plusieurs aimants en fer à cheval B, superposés et fixés à la planche P (*fig.* 657). — L'induit est un système de deux bobines H,

(*) Cette machine n'est elle-même qu'une transformation de la première machine d'induction, construite par Pixii en 1832. — Dans la machine de Pixii, c'était l'aimant inducteur qui était mobile, les bobines induites étant fixes.

que l'on met en rotation autour d'un axe horizontal A, à l'aide d'une chaine sans fin qui passe sur la roue R.

L'axe porte une pièce métallique CC′ à laquelle sont fixées deux pièces de

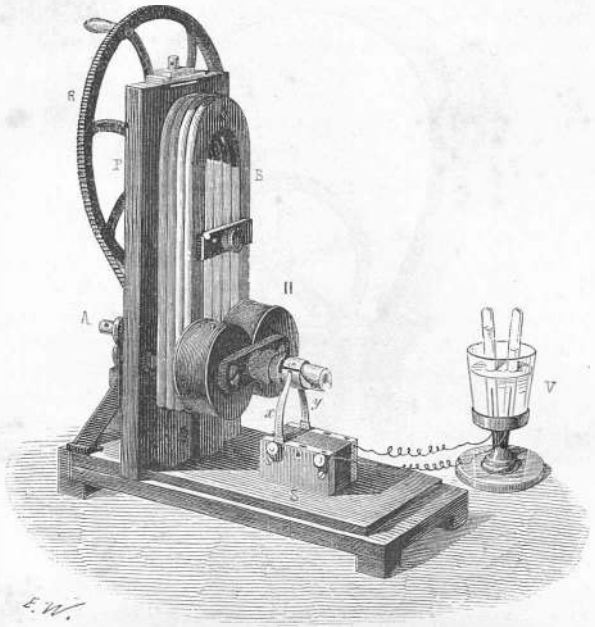


Fig. 657. — Machine de Clarke.

fer doux CD et C′D′ qui forment les noyaux des bobines (*fig* 658). L'une des extrémités du fil de la bobine CD est fixée à l'axe, l'autre extrémité est soudée à une virole E, isolée de l'axe métallique par un cylindre en ivoire; il en est de même de l'autre bobine C′D′, mais le sens de l'enroulement est interverti : sur CD, le fil s'enroule, en dessus, de gauche à droite; sur C′D′ il s'enroule de droite à gauche. Deux ressorts x et y font communiquer la virole et l'axe avec les deux extrémités d'un conducteur M.

Supposons que l'on fasse tourner les bobines autour de l'axe, dans le sens des aiguilles d'une montre, et considérons, en particulier, la bobine CD pendant qu'elle effectue une première demi-révolution, *au-dessous* du plan horizontal *ba*, *s'éloignant* ainsi du pôle *b*, et *s'approchant* du pôle *a*. D'après la loi de Lenz (867), le courant induit doit contrarier le mouvement, c'est-à-dire qu'il doit avoir un sens tel, que la bobine CD devienne un solénoïde ayant un pôle austral en C (pôle *attiré* par *b* et *repoussé* par *a*) (*fig*. 658). Le courant induit doit donc avoir sa gauche du côté C; il se rend à la virole, et va dans le conducteur M, de x vers y. — Quant à l'autre bobine C′D′, elle se déplace *au-dessus* du plan horizontal *ab*, s'éloignant de *a* et s'approchant en même temps de *b*; dès lors, si le sens de l'enroulement du fil était le

même pour les deux bobines, les deux courants induits seraient de sens inverse, et s'annuleraient dans le conducteur M; *l'inversion du sens de l'enroulement* a pour effet d'amener les deux courants induits à parcourir le conducteur M dans le même sens.

Quand la bobine CD a dépassé le pôle austral, elle effectue une deuxième demi-révolution, *au-dessus* du plan horizontal *ab*, en *s'éloignant* du pôle *a*, et se *rapprochant* de *b* ; donc, d'après la loi de Lenz, le courant induit doit constituer dans cette bobine un solénoïde ayant son pôle boréal en C (pôle *attiré* par *a* et *repoussé* par *b*). Le courant, ayant ainsi sa droite du côté C, passe maintenant de la bobine à l'axe, et marche, dans le conducteur M, de *y* vers *x*. — Le même raisonnement montre que, dans la bobine C'D', le courant induit pendant cette deuxième demi-révolution, est également dirigé de *y* vers *x*, dans le conducteur M.

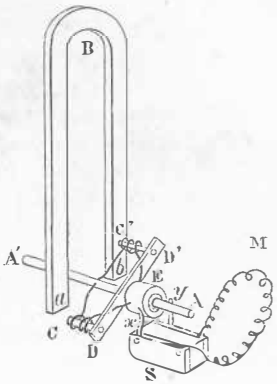


Fig. 658.

En résumé, la machine de Clarke est à *courants alternatifs* : il y a inversion du courant dans le conducteur extérieur M, au moment où le plan déterminé par les axes des bobines devient horizontal. A ce moment, l'intensité du courant est nulle : elle est maximum, dans un sens ou dans l'autre, lorsque ce plan devient vertical.

Si l'on veut, avec cette machine, produire des effets d'électrolyse, comme la décomposition de l'eau ou des sels métalliques, il faut faire usage d'un commutateur, placé sur l'axe de rotation (*fig.* 657), pour amener les courants successifs à traverser toujours l'électrolyte dans le même sens.

887. Machine de l'Alliance. — Dans la pratique industrielle, et notamment pour l'éclairage électrique, les courants alternatifs présentent certains avantages. La première machine industrielle à courants alternatifs qui ait été réalisée est fondée sur le principe de la machine de Clarke : elle a été construite par la Compagnie *l'Alliance*, pour l'éclairage électrique des phares.

La machine comprend jusqu'à quarante aimants en fer à cheval, assujettis autour d'un même axe horizontal, et répartis en cinq groupes, comprenant chacun huit aimants dans un même plan vertical. — Les bobines induites sont fixées sur un tambour intérieur, dont l'axe est horizontal, et auquel une machine à vapeur imprime un mouvement de rotation rapide. Ces bobines sont associées les unes aux autres comme les éléments d'une pile, de manière à former une seule série. — Cette machine fonctionne avec une régularité remarquable.

888. Machine dynamo-électrique de Gramme, à courants continus. — Une machine dynamo-électrique diffère d'une machine magnéto-électrique en ce que l'inducteur, au lieu d'être un système d'aimants, est un système d'électro-aimants, ce qui permet d'obtenir, à dimensions égales, un champ électrique d'une bien plus grande intensité.

Pour développer le magnétisme dans l'électro-aimant inducteur, on peut employer un courant électrique distinct, produit par une machine

magnéto-électrique auxiliaire. Mais. dans la plupart des cas, on évite cette complication en introduisant le fil de l'électro-aimant dans le circuit même des conducteurs que doit parcourir le courant induit. — On peut considérer alors le noyau de l'électro-aimant inducteur comme possédant, avant que la machine soit mise en mouvement, une aimantation faible, qui est due, soit à l'action du magnétisme terrestre, soit au magnétisme rémanent. Cette faible aimantation suffit pour donner naissance, dès que la rotation commence, à un courant induit, qui développe lui-même dans l'électro-aimant une aimantation de plus en plus grande, jusqu'au moment où la machine atteint son régime régulier. — Le travail dépensé pour faire mouvoir la machine est ainsi transformé, presque sans intermédiaire, en une succession de courants. De là, le nom de *machines dynamo-électriques* qui a été donné à ce genre de machines.

La figure 659 représente l'une des dispositions des machines dynamo-

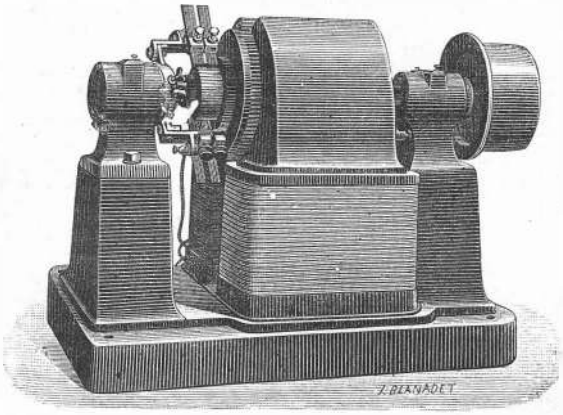


Fig. 659. — Machine dynamo-électrique de Gramme, à courants continus.

électriques de Gramme : c'est celle qu'on désigne dans l'industrie sous le nom de *type supérieur*, parce que c'est à la partie supérieure de la machine qu'est disposé l'anneau, dans une cavité cylindrique ménagée dans les deux armatures d'un électro-aimant en fer à cheval. — La plaque de fondation, les noyaux des électro-aimants, leurs pièces polaires et les supports de l'axe de rotation, sont fondus d'une seule pièce, ce qui rend l'appareil très robuste.

Une machine de ce type, pesant 4000 kilogrammes, et dans laquelle l'anneau fait 450 tours par minute, peut fournir un courant de 600 ampères, avec une force électromotrice de 110 volts. Dans ces conditions, 600 coulombs circulent dans la machine en une seconde; il en résulte que le travail dépensé,

par seconde, pour produire le courant, doit être de 600×110 ou 66 000 joules. Autrement dit, pour actionner ce générateur de courants, il faut employer un moteur à vapeur, ou un moteur hydraulique, dont la puissance serait au moins de 66000 watts, ou de 90 chevaux-vapeur. (Le cheval-vapeur vaut 736 watts). — Les plus puissantes machines dynamo-électriques à courants continus permettent d'atteindre, soit une intensité de 1000 ampères, soit une force électro-motrice de 2000 volts.

Remarque. — En général, si, pendant la marche d'une machine d'induction, la force électromotrice est de E volts, et si l'intensité du courant est de i ampères, la puissance absorbée par cette production d'électricité est de Ei watts. — En réalité, la puissance du moteur qui imprime le mouvement aux organes de la machine doit être un peu supérieure à cette valeur, en raison des pertes d'énergie mécanique, par les frottements.

889. Machine dynamo-électrique de Gramme, à courants alternatifs. — Les figures 660 et 661 représentent la disposition donnée à la machine Gramme, pour recueillir des courants alternatifs, et en même temps pour obtenir plusieurs circuits indépendants, avec chacun desquels on pourra, par exemple, alimenter un certain nombre de foyers de lumière électrique.

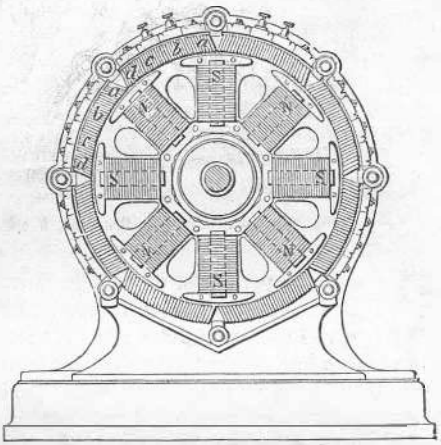


Fig. 660. — Disposition de la machine de Gramme à courants alternatifs.

Ce sont ici les électro-aimants inducteurs qui sont mobiles; ils sont excités par le courant que produit une machine dynamo-électrique auxiliaire, à courant continu. Sur l'axe de rotation sont disposés huit électro-aimants droits (*fig.* 660), dont les pôles N. S, N. S... sont alternés. L'anneau qui porte les hélices induites est extérieur aux électro-aimants, et fixe : les balais sont supprimés. Les hélices de l'anneau sont au nombre de huit, comme le montre la figure; mais chacune d'elles est décomposée en quatre hélices distinctes, *a*, *b*, *c*, *d*. On réunit entre elles toutes les hélices *a*, de manière à en former, avec un conducteur extérieur, un premier circuit; puis, les hélices *b*, de manière à en former un second circuit; et de même pour les hélices *c*, et pour les hélices *d*. Chacun des groupes d'hélices éprouvant, pendant le mouvement, la même succession d'influences de la part des pôles alternés des électro-aimants, chacun de ces quatre groupes constitue un générateur indé-

pendant de courants alternatifs. — En multipliant plus ou moins les

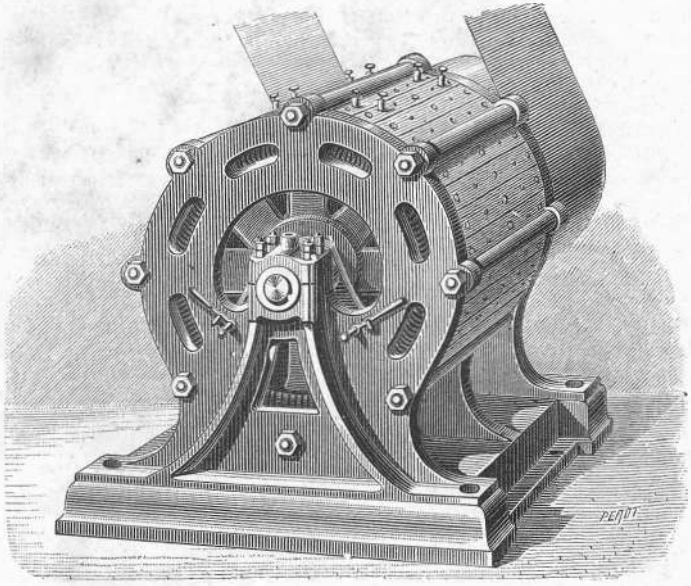


Fig. 661. — Machine de Gramme, à courants alternatifs.

groupes d'hélices partielles, on peut augmenter plus ou moins le nombre des circuits distincts, selon l'emploi qu'on en veut faire.

890. Appareils divers fondés sur l'induction magnétique. — Outre les machines que nous venons d'étudier, et qui servent à produire des courants intenses, il existe des appareils d'induction magnéto-électrique moins puissants, et présentant des dispositions variables suivant les usages auxquels on les destine.

Ainsi, le téléphone de Bell (880) est évidemment un appareil d'induction magnéto-électrique. — Pour l'*électro-thérapie*, c'est-à-dire pour le traitement de certaines maladies par l'électricité, on fait usage d'appareils magnéto-électriques, présentant une assez grande analogie avec la machine de Clarke.

Enfin, il est des circonstances où l'on n'a besoin que d'un courant d'une durée très courte, mais d'une assez grande intensité, pour produire un effet déterminé (explosion d'une mine ou d'une torpille, mouvement à imprimer à un signal mobile, etc.). On fait alors usage d'appareils d'une construction particulièrement simple, dans lesquels le courant est produit par le déplacement brusque d'une bobine, au voisinage d'un aimant. — Nous citerons comme exemple l'inducteur

Postel-Vinay (*fig.* 662), qui est employé sur certaines lignes de chemins de fer pour transmettre des signaux d'une station à l'autre.

Entre les deux pôles A et B d'un aimant, se trouve une bobine dont le noyau de fer doux CD sert d'armure à l'aimant. En agissant sur la manivelle M, on fait d'abord décrire à la bobine, assez lentement, une demi-révolution autour de l'axe H, qui est parallèle aux branches de l'aimant : on communique ainsi une tension à un ressort spiral, disposé à l'intérieur du cylindre R. Si l'on abandonne alors brusquement

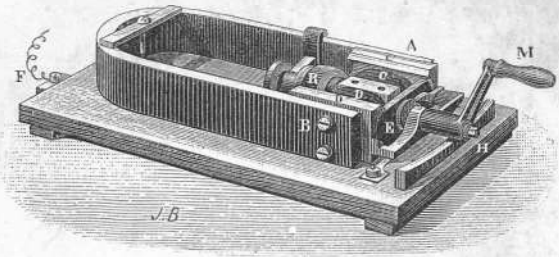


Fig. 662. — Inducteur Postel-Vinay.

la manivelle, le système, sollicité par le ressort, revient rapidement à sa position primitive : le sens de l'aimantation du noyau CD étant brusquement interverti, il en résulte, dans la bobine, un courant induit d'autant plus intense que le mouvement est plus rapide. La force électromotrice du courant (différence des potentiels des deux extrémités du fil de la bobine) peut atteindre 300 volts. — L'une des extrémités du fil de la bobine est soudée à l'axe H, l'autre à une virole en cuivre E, isolée de l'axe. On recueille le courant au moyen de ressorts frotteurs, convenablement disposés. — L'appareil inducteur de chaque station communique, par un fil télégraphique, avec une sonnerie électrique placée à la station suivante, la terre servant de fil de retour. À chaque déplacement brusque de la bobine, correspond un choc du marteau sur le timbre, c'est-à-dire un appel. — Chacun des signaux à transmettre est représenté conventionnellement par un nombre déterminé d'appels successifs.

V. — ÉCLAIRAGE ÉLECTRIQUE.

891. Éclairage par l'arc voltaïque. — Lampes à arc. — L'arc voltaïque, dont nous avons décrit les principales propriétés (785), constitue une source de lumière très intense, qui a été utilisée pour l'éclairage, dans les *lampes électriques à arc.*

Les courants employés, produits par une machine d'induction, peuvent être continus ou alternatifs. — Quand on emploie une pile de Bunsen, il faut au moins 40 éléments, associés en série, pour obtenir un arc voltaïque ayant une intensité lumineuse suffisante (*).

Pour que, dans une *lampe à arc*, la lumière conserve une intensité constante, il est nécessaire que les extrémités des baguettes de charbon, malgré leur usure progressive, soient maintenues toujours à une même distance. — Cette condition est réalisée, dans les divers systèmes de *lampes à arc*, au moyen d'*appareils régulateurs* dont la partie essentielle est un électro-aimant.

892. Régulateur de Foucault. — Le premier *régulateur* a été imaginé par Foucault. La figure 663 représente cet appareil, avec les modifications qui y ont été apportées par Duboscq.

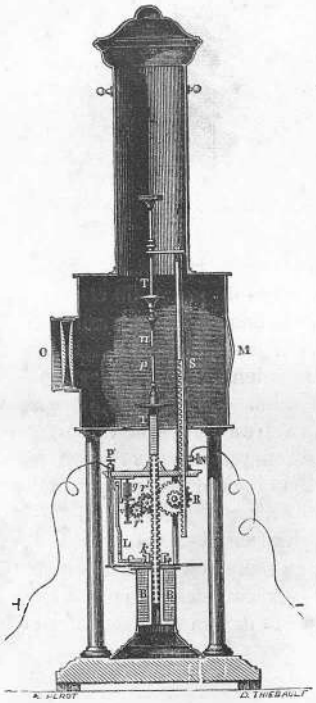


Fig. 663.
Régulateur de la lumière électrique.

Les baguettes de charbon p, n, sont fixées aux extrémités de deux tiges métalliques T T′ : la tige T est munie, à sa partie inférieure, d'une crémaillère qui engrène avec les dents de la roue R ; la tige T′ est supportée de même par une crémaillère, qui passe dans la colonne creuse S et vient engrener avec un pignon fixé à la même roue R. Cette roue R est assujettie à un ressort qui tend toujours à lui imprimer un mouvement de rotation, de manière à faire monter la crémaillère de la tige T et à faire descendre en même temps la crémaillère de la tige T′ : si ces pièces étaient abandonnées à elles-mêmes, les deux charbons seraient toujours entraînés l'un vers l'autre, jusqu'au contact. Mais ce mouvement n'est possible qu'à la condition d'entraîner aussi le système des roues r, r' et de la vis sans fin v : le principe de l'appareil consiste précisément à rendre ce système immobile tant que le courant passe convenablement de p en n, et à le laisser se mettre en mouvement dès que le courant commence à s'affaiblir par l'usure des charbons.

Pour cela, on a placé, dans le pied de l'appareil, une bobine dont le noyau est formé par un tube de fer doux, et dont le fil métallique est représenté par sa section en BB : l'une des extrémités de ce fil part du bouton P et est mise en communication avec le pôle positif

(*) Dans ces conditions, l'intensité lumineuse de l'arc vaut 100 carcels, ou 1000 bougies décimales (livre IV, chap. I) ; l'intensité du courant *continu* est d'environ 15 am-

de la pile ; l'autre extrémité communique avec la plaque métallique qui forme la base de la bobine, et par suite avec la tige T, qui passe à frottement doux à travers cette plaque. On voit que, quand les charbons sont au contact, ou situés encore à une faible distance, le courant, arrivant par le bouton P, parcourt le fil de la bobine, passe dans la tige T, franchit l'intervalle qui sépare p de n, et revient à la pile par la tige S et le bouton N. Or, le courant aimantant le noyau de la bobine, celui-ci attire l'anneau de fer doux k et la branche horizontale du levier L à laquelle l'anneau est fixé ; la branche verticale de ce levier est alors mise en mouvement de gauche à droite, et vient buter contre une roue dentée horizontale, fixée à l'axe de la vis v. Tout le système des engrenages est ainsi arrêté tant que le courant conserve son intensité, et les charbons restent fixes. — Au contraire, quand l'intensité du courant et celle de la lumière produite viennent à diminuer par l'usure des charbons, le magnétisme développé dans l'électro-aimant diminue, et il arrive un moment où le contact k, obéissant à l'action d'un petit ressort métallique qu'on aperçoit au-dessous de lui, s'éloigne de l'électro-aimant : la branche verticale du levier L s'écarte alors de la roue dentée qu'elle arrêtait, et tout le système des engrenages, se mettant en mouvement, produit un rapprochement des charbons p et n. On conçoit qu'il résulte, de ce rapprochement même, une augmentation dans l'intensité du courant et dans la force magnétique de l'électro-aimant, de sorte que le contact k est bientôt attiré de nouveau, le système des engrenages s'arrête, et ainsi de suite (*).

Lorsqu'on veut projeter la lumière dans une direction déterminée, on place l'appareil, comme le représente la figure 665, dans une boîte métallique rectangulaire, qui porte, dans l'une de ses faces verticales, une ouverture garnie d'un système de lentilles O. — A l'intérieur de la boîte, sur la face opposée à l'ouverture, est un miroir concave M, qui renvoie vers les lentilles la lumière qu'il reçoit.

893. Régulateurs fonctionnant sans mécanisme. — Expériences de M. E. Fernet. — Au commencement de l'année 1866, M. E. Fernet publia une disposition destinée à supprimer tout mécanisme, pour la production et le réglage de la lumière électrique.

Une tige métallique horizontale est suspendue par deux fils de soie fixés, de part et d'autre, à une petite distance de son milieu, de manière qu'une force très faible suffit pour l'écarter de sa position d'équilibre. A l'extrémité de cette tige, et perpendiculairement à sa direction, est assujetti l'un des charbons, dirigé lui-même horizontalement ; l'autre charbon est placé en regard, dans une position fixe, et tangentiellement à l'arc de cercle que décrira l'extrémité

pères. — La résistance de l'arc est d'environ $1^{ohm},33$; si l'on calcule alors la différence de potentiel des deux pointes de charbon, par la formule $i = \frac{V}{R}$, on trouve 20 volts. — M. Edlung a démontré que l'arc voltaïque donne naissance à une force électromotrice d'environ 30 volts, qui est *en sens inverse* de celle de la pile ; le courant de la pile doit donc produire, aux deux extrémités des charbons, une chute de potentiel de 50 volts. La perte d'énergie correspondante à la production de la lumière est donc de 15×50 joules par seconde (802) ; en d'autres termes, l'éclairage par l'arc voltaïque absorbe, par carcel, une puissance mécanique de 7,5 watts.

(*) Le pignon de la roue R a un nombre de dents égal à la moitié du nombre des dents de la roue elle-même : il en résulte que, à chaque mouvement effectué par la roue, le point n descend d'une quantité qui est la moitié de celle dont le point p s'élève ; le pôle positif s'usant à peu près deux fois plus vite que le pôle négatif, la position de ces extrémités dans l'espace reste ainsi sensiblement constante.

du charbon mobile, dans son mouvement. L'un des pôles est mis en communication avec le charbon fixe; l'autre pôle, avec la tige métallique, au moyen d'une pointe verticale, fixée au milieu de cette tige et plongeant dans un petit godet de mercure. — Les pointes des deux charbons étant amenées au contact, on tord le système des fils de suspension, de manière à appuyer les pointes des deux charbons l'une contre l'autre; dès que le circuit est fermé, on voit le charbon mobile s'écarter du charbon fixe, en vertu de la force répulsive qui s'exerce entre deux portions consécutives d'un même courant (note de la page 682); il se forme donc un arc électrique, et comme la force de torsion augmente avec l'angle d'écart, on obtient bientôt une position d'équilibre.

Cet équilibre est stable; puisque tout accroissement de distance des charbons diminue la force répulsive et augmente la force de torsion, tandis qu'un rapprochement diminue la force de torsion et augmente la force répulsive. L'usure des charbons fait passer le charbon mobile, d'*une manière continue*, par une série de positions d'équilibre : les extrémités des charbons conservent entre elles une distance sensiblement constante, pendant un temps très long.

L'appareil peut d'ailleurs être employé soit avec une pile électrique, soit avec les machines d'induction, à courants continus ou à courants alternatifs. Mais il a, comme défaut, sa sensibilité même; il ne peut fonctionner régulièrement que sur un support à peu près immobile : des trépidations un peu fortes, imprimées au sol sur lequel il est placé, suffisent pour amener des irrégularités dans la lumière (*)

894 Bougie électrique de M. Jablochkoff. — L'idée essentiellement pratique, et d'une remarquable simplicité, qui est due à M. Jablochkoff (1876), consiste à placer les deux charbons *parallèlement entre eux, dans une position fixe* (*fig.* 660), de manière que la combustion simultanée de leurs deux extrémités laisse toujours à une même distance les points entre lesquels doit se produire l'arc électrique. Pour obliger l'arc à jaillir toujours entre les extrémités libres, il suffit de séparer les charbons, dans toute leur longueur, par un corps isolant, tel que le kaolin, qui soit suffisamment fusible, à la température élevée de l'arc électrique, pour dégager successivement les deux baguettes. « Ces deux charbons et le corps isolant constituent, à proprement parler, dit M. Jablochkoff, une *bougie électrique*, qui se place dans un chandelier spécial. Ce chandelier se compose de deux pièces métalliques S, A, isolées l'une de l'autre, et montées sur une base d'ardoise ou de quelque autre matière. Ces deux pièces constituent une pince, dans laquelle les deux charbons sont serrés par un ressort *r*, de manière à établir un

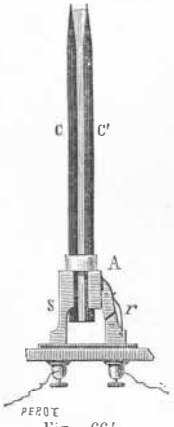


Fig. 661.
Bougie Jablochkoff.

(*) Divers essais ont été faits par M. Fernet, pour réaliser la mobilité de la tige avec d'autres dispositions; par exemple, en l'assujettissant à un axe métallique légèrement incliné sur la verticale, de manière qu'elle tende à prendre, sous l'action de son poids, la direction de la ligne de plus grande pente, dans le plan qu'elle décrit

bon contact. Les deux fils, qui amènent le courant, aboutissent à cette pince. »

Pour allumer la bougie, il faut, si elle est à portée de la main, établir la continuité entre les charbons en plaçant, pendant quelques secondes, sur le sommet de la bougie, un morceau de mine de crayon. — Si la bougie doit être allumée à distance, on place à l'avance, entre les extrémités des charbons, un petit fil métallique fin, un morceau de plomb ou un fragment de mine : dès que le courant est établi, la fusion ou la combustion de ce corps conducteur supprime la continuité, et l'arc voltaïque reste établi (*).

Pour éviter l'usure inégale des deux charbons, il faut employer des machines à *courants alternatifs*.

895. Éclairage par un fil conducteur porté à l'incandescence. — Système Edison. — L'Exposition d'électricité qui a eu lieu en 1881 a fait connaître en France un mode d'éclairage électrique qui permet de multiplier les foyers de lumière, en donnant à chacun d'eux moins d'intensité. — Il est introduit aujourd'hui jusque dans les usages domestiques.

Dans la disposition imaginée par M. Edison, de New-York, le courant passe dans un fil de charbon C (*fig.* 665), de la grosseur d'un crin de cheval, placé dans un petit globe de verre où l'on a fait un vide aussi parfait que possible. Ce fil a été obtenu par la carbonisation d'un filament découpé dans une tige de bambou : il est recourbé et fixé par ses extrémités à deux fils de platine, isolés l'un de l'autre, qui servent de conducteurs. — Le fil de charbon, porté à une vive incandescence par le courant, produit une lumière d'un jaune doré. Si le vide a été bien fait dans le globe de verre, le charbon ne brûle pas, puisqu'il ne trouve pas d'oxygène dans l'espace qui l'entoure (**).

Fig. 665. Lampe Edison.

Fig. 666. Lampe Maxim

dans son mouvement : la force antagoniste de la répulsion électrique peut alors être rendue très petite, en réglant l'inclinaison de l'axe de rotation. — L'appareil, ainsi disposé, se dérange moins facilement que le précédent ; il exige cependant toujours une installation sur un sol à peu près immobile.

(*) Une bougie Jablochkoff, fonctionnant normalement, doit avoir une intensité lumineuse de 40 carcels ou 400 bougies décimales (liv. V, chap. I). — Pour qu'il en soit ainsi le courant doit avoir une intensité de 9 ampères, et la différence de potentiel aux deux bornes de la bougie doit être égal à 42 volts. Quant à l'énergie dépensée par le courant pour la production de cette quantité de lumière, elle est égale à 9×42 ou 378 joules par seconde ; en d'autres termes, l'éclairage par la bougie Jablochkoff absorbe une puissance mécanique de 9,4 watts par carcel.

(**) L'expérience a montré cependant que la durée d'un même fil n'est pas indéfinie quand il a fonctionné, à divers intervalles, pendant 600 à 900 heures, il éprouve une désorganisation qui en détermine la rupture ; il faut alors le renouveler.

On a imaginé un grand nombre de dispositions analogues à la précédente. — La figure 666 représente la *lampe Maxim*, dans laquelle le fil de charbon est plusieurs fois replié sur lui-même ; il provient de la carbonisation d'une bande mince de carton bristol. Le globe a été rempli d'un gaz hydrocarboné, dans lequel la combustion ne peut s'effectuer. Une clef, placée à la base du globe, et présentant la forme du robinet d'un bec de gaz, permet d'établir ou d'interrompre le courant, de manière à allumer ou à éteindre la lampe.

Les courants destinés à alimenter ces foyers de lumière peuvent être produits, soit par des accumulateurs (778), soit par des machines de Gramme ou par d'autres machines dynamo-électriques (*).

VI. — TRANSPORT DU TRAVAIL PAR LES COURANTS ÉLECTRIQUES.

896. Réversibilité des machines magnéto-électriques et dynamo-électriques. — Transport du travail. — On a vu dans ce qui précède, comment l'application d'une force motrice à une machine d'induction donne naissance à une succession de courants électriques : c'est une *transformation du travail mécanique en énergie électrique*, sous forme de courants. — Or, de même que les machines de Holtz ou de Wimshurst, les machines d'induction sont *réversibles* : si l'on fait passer le courant d'une pile dans le conducteur d'un disque de Faraday (*fig.* 655) ou d'une roue de Barlow (*fig.* 599), le disque ou la roue acquièrent un mouvement de rotation continu. Il en est de même de toutes les machines magnéto-électriques ou dynamo-électriques : si l'on fait passer, dans l'une des machines de Gramme (*fig.* 656, 659), un courant suffisamment intense, produit par une pile, on voit la machine se mettre en mouvement ; et ce mouvement peut être utilisé pour la production d'un travail mécanique ; c'est une *transformation de l'énergie électrique* du courant de

(*) On construit deux types de lampe Édison, dont les intensités lumineuses sont respectivement 2 carcels ou 20 bougies et 1 carcel ou 10 bougies (liv. IV, chap. I). — La lampe de grand modèle exige un courant de 0 amp. 64 ; la différence de potentiel aux deux bornes est de 90 volts, et la résistance du fil de charbon (quand la lampe est allumée) est de 140 ohms. Pour le petit modèle, ces deux dernières quantités sont réduites de moitié. — L'énergie dépensée par le courant pour produire 2 carcels, dans la lampe de grand modèle est donc $0{,}64 \times 90 = 58$ joules par seconde. Cet éclairage absorbe donc une puissance mécanique de 29 watts par carcel.

Il en résulte que l'éclairage par les lampes à incandescence est plus coûteux que l'éclairage par l'arc voltaïque. En effet, en se reportant aux notes des pages 742 et 745, on voit que la puissance mécanique absorbée, par carcel, est :

29 watts pour les lampes Édison ;
9,4 — pour les bougies Jablochkoff ;
7.5 — pour les lampes à régulateur.

Le prix de revient de l'éclairage électrique est donc d'autant plus élevé que la lumière est répartie en un plus grand nombre de foyers.

la pile, *en travail*. — La machine, actionnée par un courant, devient alors un *moteur électrique*, et fonctionne comme un *moteur à vapeur* actionné par la force élastique d'une vapeur, ou comme un *moteur hydraulique* actionné par la force vive d'une chute d'eau.

Mais le courant électrique qui actionne un pareil moteur peut être fourni par une autre machine semblable, et l'on est ainsi conduit à réaliser la combinaison suivante : — Deux machines, dynamo-électriques ou magnéto-électriques, auront leurs fils réunis entre eux par un circuit conducteur. L'une d'elles sera mise en mouvement par un moteur quelconque, et se comportera comme un *générateur* de courants électriques : ce sera la *machine génératrice*. L'autre machine, recevant le courant produit par la première, prendra le nom de *machine réceptrice* : sous l'action de ce courant, elle se mettra en mouvement, et se comportera comme un moteur électrique, permettant d'effectuer tel ou tel travail.

L'expérience est facile à faire, dans les cours, avec deux machines de Gramme (*fig.* 656). — Elle fut faite pour la première fois en 1873, à l'Exposition de Vienne, par M. H. Fontaine. La génératrice était mise en mouvement par un moteur à gaz ; le courant était transmis à une autre machine, située à une distance de 1 kilomètre ; le mouvement de la réceptrice faisait fonctionner une pompe.

Il est facile de concevoir quelle peut être, pour l'industrie, l'importance du transport du travail par les courants électriques. Une solution complètement pratique de ce problème permettrait d'utiliser de nombreuses force motrices naturelles, comme des chutes d'eau, restées jusqu'ici sans emploi en raison de leur éloignement par rapport aux grands centres industriels. — Dans les expériences qui ont été faites récemment entre Lauffen et Francfort-sur-le-Mein, la génératrice installée à Lauffen était actionnée par la chute du Rhin : la puissance mise en jeu était d'environ 500 chevaux-vapeur ; les courants étaient transmis à une réceptrice installée à Francfort, à une distance de 175 kilomètres; d'après les mesures effectuées, on obtint à Francfort une fraction notable de cette puissance (*).

897. Coefficient de rendement. — Quand on effectue ainsi le transport du travail, on ne retrouve jamais, dans le travail effectué par la

(*) Les courants alternatifs produits par la génératrice étaient transmis à la réceptrice par trois fils de ligne : c'est la disposition désignée sous le nom de *courants triphasés* (901). — La génératrice fournissant directement des courants de grande intensité et de faible force électromotrice, on les transformait, à l'aide de bobines d'induction construites comme celle de la figure 642, en courants de très grande force électromotrice (20 000 à 30 000 volts) et d'intensité relativement faible; on pouvait alors transmettre ces courants à grande distance, par des conducteurs de faible section, sans que la perte d'énergie fût trop considérable (900). — Enfin, au point d'arrivée, avant d'actionner la réceptrice, ces courants étaient convertis de nouveau, au moyen de *transformateurs* (900), en courants de grande intensité.

réceptrice, la totalité du travail dépensé sur la génératrice pendant le même temps. On appelle *coefficient de rendement*, ou simplement *rendement*, le rapport de la quantité d'énergie électrique transformée, par la réceptrice, en travail mécanique utilisable, à la quantité d'énergie électrique communiquée pendant le même temps à la génératrice, par une dépense de travail mécanique.

Le rendement est évidemment toujours inférieur à l'unité : même avec les machines les plus parfaites, il y a toujours perte d'énergie, sous forme de chaleur dégagée dans les conducteurs; de plus, on ne saurait supprimer complètement les vibrations et les chocs des divers organes des machines.

898. Expression du coefficient de rendement. — Considérons, par exemple, la combinaison représentée par la figure 667. Deux disques de

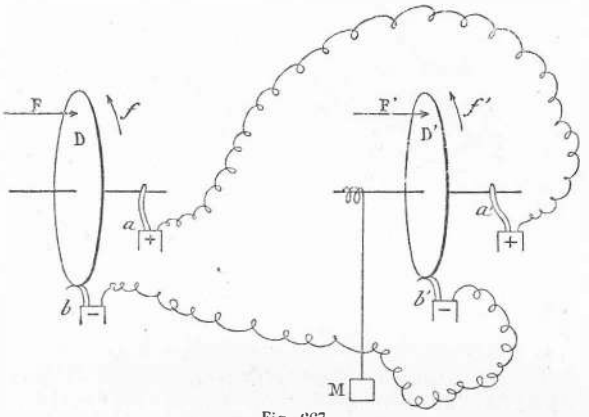


Fig. 667.

Faraday D et D′ sont réunis entre eux par des fils conducteurs, de *a* en *a′*, et de *b* en *b′*. Lorsque le disque D, placé dans un champ magnétique F, est animé d'un mouvement de rotation uniforme, dans le sens de la flèche *f*, il est assimilable à une pile dont *a* serait le pôle positif et *b* le pôle négatif (884). Le courant ainsi produit, en passant dans le disque D′, est descendant dans celui des rayons du disque qui vient toucher le ressort *b′*; sous l'action du champ magnétique F′, ce courant tend à se déplacer vers sa droite, en sorte que le disque D′ se met en mouvement dans le sens de la flèche *f′*, malgré la résistance opposée par le poids de la masse M, qui est soulevée progressivement. Une partie du travail absorbé par D est ainsi restitué par e disque D′ : la vitesse de rotation du disque D′ est d'ailleurs moindre que celle de D.

Pour obtenir une expression de l'*intensité* du courant, on remarquera que les deux disques en mouvement se comportent comme deux piles, dont les pôles positifs seraient en *a* pour le disque D, en *a′* pour le disque D′, et dont les forces électromotrices E et E′ seraient de sens contraires : leur

résultante est $E - E'$. Si R est la résistance totale du circuit, évaluée en ohms, l'intensité du courant, évaluée en ampères, sera $i = \frac{E - E'}{R}$ (*).

Il est facile d'en déduire une expression du *rendement*. — En effet, dire que la force électromotrice de la génératrice est E, c'est dire que chaqu coulomb qui passe de *b* en *a* reçoit une énergie de E joules; par suite, puisque la masse électrique mise en mouvement dans le circuit est de *i* coulombs par seconde, elle reçoit du moteur qui actionne la génératrice D une énergie de Ei joules par seconde. En d'autres termes, la puissance du moteur est théoriquement $P = Ei$ watts; elle est, en réalité, un peu plus grande, en raison des frottements. — De même, chaque coulomb, pour traverser D' de *b'* en *a'*, devrait recevoir E' joules; donc, inversement, dans le cas actuel, chaque coulomb qui circule dans le sens *a'b'* communique à la réceptrice une énergie de E' joules; par suite, les *i* coulombs qui parcourent le circuit, dans chaque seconde, communiquent à la réceptrice une énergie de $E'i$ joules. C'est l'expression de la quantité de travail utilisée, en une seconde, pour soulever la masse M; on peut dire que la puissance mécanique utilisable au point d'arrivée est $P' = E'i$ watts. — Le *rendement*, c'est-à-dire le rapport de P' à P, est donc représenté par l'expression

$$\rho = \frac{E'}{E}.$$

Remarque. — Cette expression montre bien que le rendement est toujours inférieur à l'unité, comme cela doit être. — En effet, le rendement ρ ne saurait tendre vers l'unité, que si la différence $E - E'$ tendait vers zéro; mais alors l'intensité *i* du courant, représentée par $\frac{E - E'}{R}$, tendrait elle-même vers zéro; par suite, la puissance dépensée $P = Ei$, et la puissance transportée $P' = E'i$, deviendraient nulles.

899. Cas particulier de deux machines magnéto-électriques identiques. — Considérons le cas particulier où la génératrice et la réceptrice sont deux machines *magnéto-électriques*, constituées par des induits identiques, tournant dans des champs magnétiques d'égale intensité. — Les forces électromotrices E et E', *indépendantes de l'intensité du courant*, sont respectivement *proportionnelles aux nombres de tours n* et *n'* effectués en une seconde par les induits de la génératrice et de la réceptrice.

On peut se proposer le problème suivant : *La génératrice étant animée d'une vitesse déterminée, quelle doit être la vitesse de la réceptrice, pour que la puissance mécanique transportée P' soit maximum?*

La puissance P', qu'il s'agit de rendre maximum, a pour expression $P' = E'i$, ou $P' = \frac{E'(E - E')}{R}$, en remplaçant *i* par sa valeur $\frac{E - E'}{R}$. Le dénominateur étant constant, P' sera maximum quand le produit des deux facteurs E' et $E - E'$ sera maximum; or la somme E de ces deux facteurs est ici constante, puisqu'on suppose que la génératrice fait un nombre déterminé *n* de tours par seconde. Dès lors, la puissance transportée P' sera maxi-

(*) Pour les machines industrielles, telles que la machine de Gramme, où, dans chaque hélice, la force électromotrice varie pendant la durée de la révolution, la self-induction a pour effet de faire croître la résistance; on doit alors remplacer R par la *résistance apparente* R' (note de la page 734).

mum quand on aura $E' = E - E'$, ou $E' = \frac{E}{2}$, ou enfin $n' = \frac{n}{2}$. — On voit donc que, dans ce cas, pour obtenir le plus grand rendement possible, on devra régler les machines-outils actionnées par la réceptrice, de manière que la vitesse de la réceptrice soit la moitié de celle de la génératrice. — La valeur du rendement sera alors $\rho = \frac{E'}{E} = \frac{n'}{n} = \frac{1}{2}$ (*).

900. Transmission de l'énergie électrique à grande distance, par courants alternatifs. — Transformateurs. — Lorsqu'on se propose de transmettre, à grande distance, l'énergie électrique développée dans une machine d'induction, actionnée par une force motrice disponible en un lieu déterminé, on est obligé d'employer, pour former le circuit, des fils métalliques dont la section ne soit pas trop considérable, afin que l'établissement de la ligne ne soit pas trop dispendieux. Il est aisé de voir que cette condition, d'après laquelle la résistance R de ces fils est déterminée, et d'autant plus grande que la distance est plus considérable, a pour conséquence la nécessité de choisir d'une manière particulière la machine qui produira le courant.

En effet, soient P la puissance mécanique, en watts, du moteur qui actionne la machine génératrice des courants, E la force électromotrice en volts, et i l'intensité en ampères : si l'on néglige les frottements qui interviennent dans le jeu de la machine, la puissance P, dépensée sur la machine génératrice, est égale à l'énergie électrique développée par seconde : $P = Ei$. — Or, si l'on désigne par R la résistance du circuit en ohms, l'énergie électrique dissipée, par seconde, sous forme de chaleur, est Ri^2. Pour que la transmission d'énergie soit avantageuse, il faut que cette perte ne soit qu'une petite fraction de P : la résistance R étant supposée très grande, il faut que l'intensité i soit très petite, et que, par suite, la force électromotrice E, ou $\frac{P}{i}$, soit très grande. — Pour obtenir une transmission économique de l'énergie électrique, il faudra donc faire choix d'une machine qui, actionnée par un moteur de puissance donnée P, produise un courant de *très faible intensité* et de *très grande force électromotrice* ; c'est précisément là le caractère d'une machine dynamo-électrique à courants alternatifs (889).

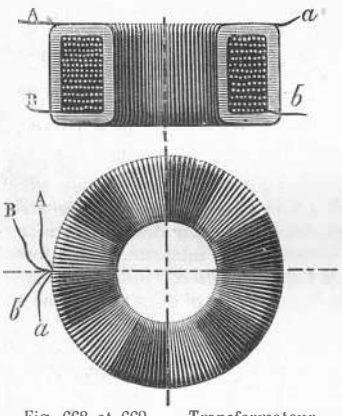


Fig. 668 et 669. — Transformateur.

Mais, d'autre part, de pareils courants ne seraient généralement pas utilisables, d'une manière avantageuse. Pour l'éclairage électrique, par exemple, il importe surtout d'obtenir des courants d'assez grande intensité. — On

(*) Ce résultat ne s'applique pas aux machines dynamo-électriques, dans lesquelles l'intensité du champ magnétique croît avec l'intensité du courant, en sorte que, pour une vitesse de rotation constante de la génératrice, la force électromotrice E n'est pas constante, et varie avec l'intensité du courant.

intercale alors dans le circuit, aux points où les courants doivent être utilisés, des appareils servant à les transformer en courants de force électromotrice beaucoup plus petite, mais d'intensité beaucoup plus grande. Ces appareils ont reçu le nom de *transformateurs*.

Un transformateur n'est autre chose qu'une bobine d'induction, dans laquelle, à l'inverse de ce qui a lieu dans la bobine de Ruhmkorff, *le fil inducteur est très fin et très long*, tandis que le *fil induit est gros et court*. Par exemple, sur un noyau formé par des fils annulaires de fer doux, isolés les uns des autres par un vernis, s'enroulent le fil inducteur AB et le fil induit *ab* (*fig.* 669), de manière qu'un secteur du fil inducteur alterne avec un secteur du fil induit. — La génératrice fournissant, dans le circuit inducteur, des courants alternatifs de grande force électromotrice et de faible intensité (20000 volts et 25 ampères, par exemple), il se développe, dans le circuit induit, des courants alternatifs secondaires, de même fréquence, mais de force électromotrice beaucoup plus faible et d'intensité beaucoup plus grande (soit 100 volts et 500 ampères). — Ce sont ces courants secondaires qu'on utilise pour l'éclairage électrique, toutes les fois que les sources de lumière doivent être placées à une grande distance du point où la machine génératrice est installée.

901. Emploi de trois fils de ligne : courants triphasés. — Dans tout ce qui précède, nous avons supposé que l'énergie électrique des courants produits par les machines d'induction était transmise par deux fils de ligne, reliant les deux balais de la machine aux deux extrémités du circuit dans lequel on devait utiliser l'énergie du courant.

Dans le cas des machines magnéto-électriques ou dynamo-électriques, analogues aux machines de Gramme (*fig.* 656, 659), on peut employer *trois fils de ligne*, en faisant subir à la machine une modification qui a pour effet de supprimer les balais, ainsi que le collecteur.

Le fil induit est formé de trois hélices identiques, enroulées sur l'anneau dans le même sens : désignons ces hélices par s_1, s_2, s_3. L'axe de rotation

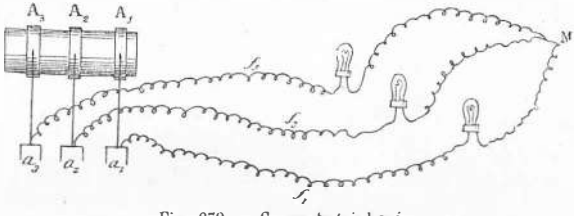


Fig. 670. — Courants triphasés.

porte trois viroles A_1, A_2, A_3 (*fig.* 670), isolées les unes des autres, et sur lesquelles appuient constamment les trois ressorts a_1, a_2, a_3. Les deux extrémités du fil de la première hélice s_1 sont soudées respectivement aux viroles A_2 et A_3; celles de l'hélice s_2, aux viroles A_3 et A_1, et enfin, celles de l'hélice s_3 aux viroles A_1 et A_2. Quand on fait tourner l'anneau dans le champ de l'inducteur, la théorie montre que chacune des hélices est le siège d'une force électromotrice d'induction, qui est tantôt positive (dans le sens de l'enroulement), tantôt négative (en sens contraire de l'enroulement); elle passe périodiquement par les valeurs 0, + E, 0, — E, 0, + E, etc. Mais, au même instant, les trois forces électromotrices e_1, e_2, e_3, dans les trois hélices, sont

telles que l'on a : $e_1 + e_2 + e_3 = o$; c'est-à-dire que l'une d'elles est toujours égale et contraire à la somme des deux autres. — Adaptons, aux trois ressorts a_1, a_2, a_3, trois conducteurs identiques, f_1, f_2, f_3, aboutissant au point M ; et mettons la machine en mouvement. — En appliquant le théorème de Kirchoff (806, *Remarque*), on trouve, pour les valeurs des intensités i_1, i_2, i_3, des courants alternatifs qui passent dans les trois fils f_1, f_2, f_3, au même instant :

$$i_1 = \frac{e_2 - e_3}{\rho + 3r}, \qquad i_2 = \frac{e_3 - e_1}{\rho + 3r}, \qquad i_3 = \frac{e_1 - e_2}{\rho + 3r},$$

en désignant par ρ la résistance de chacune des hélices, par r celle de chacun des conducteurs, et en ne tenant pas compte de l'accroissement de résistance produit par la self-induction.

Chacune des expressions $e_2 - e_3$, $e_3 - e_1$ et $e_1 - e_2$, alternativement positive et négative, varie périodiquement, mais, au même instant, chacune d'elles est égale et contraire à la somme des deux autres ; en effet, on a identiquement :

$$e_2 - e_3 + e_3 - e_1 + e_3 - e_2 = o,$$

et par suite, en faisant la somme algébrique des intensités,

$$i_1 + i_2 + i_3 = o ;$$

ce qui revient à dire que le courant, arrivant au point M par deux des fils, retourne à la machine par le troisième. — C'est la disposition qu'on désigne sous le nom de *courants triphasés*. Elle a l'avantage de se prêter, sans perte d'énergie par étincelles (*), aux variations de vitesse que peut éprouver la machine, si la puissance motrice qui l'actionne vient à subir elle-même quelques variations.

On peut, par exemple, installer des appareils d'éclairage électrique sur chacun des trois conducteurs f_1, f_2, f_3, vers l'extrémité M ; ces trois appareils seront actionnés de la même manière, par les courants alternatifs fournis par la machine.

(*) Dans la machine de Gramme (*fig.* 656, 659), l'angle de calage, réglé pour une vitesse déterminée, devrait être modifié chaque fois que la vitesse de rotation varie. Quand ces variations se produisent accidentellement, les étincelles qui éclatent peuvent arriver à détériorer l'appareil.

LIVRE SIXIÈME

MÉTÉOROLOGIE

902. — La *météorologie* a pour objet l'étude des phénomènes qui s'accomplissent à la surface de notre globe et dans notre atmosphère.

Ces phénomènes sont généralement très complexes : il est parfois difficile de discerner le degré d'influence de chacune des causes qui les produisent. D'ailleurs, comme il est impossible de faire varier méthodiquement les conditions dans lesquelles ils s'accomplissent, le météorologiste doit se contenter de comparer le plus grand nombre possible d'*observations*, faites dans des circonstances diverses et telles que les lui offre la nature; enfin, ces observations elles-mêmes présentent encore des lacunes, pour les points du globe sur lesquels on n'a que des données météorologiques incomplètes. C'est en raison de ces difficultés, que les progrès de la météorologie ont été beaucoup plus lents que ceux des autres parties de la science. — Nous nous bornerons à l'exposé des résultats qui présentent actuellement un caractère de certitude suffisante (*).

I. — RÉPARTITION DE LA TEMPÉRATURE A LA SURFACE DE LA TERRE.

903. Observations thermométriques. — Pour qu'un thermomètre, installé à demeure, indique réellement la température de l'air, il est indispensable qu'il soit placé à l'ombre, de manière qu'il ne reçoive pas directement les rayons du soleil. Il est nécessaire, en outre, de disposer des écrans autour de lui, afin de le garantir encore de la chaleur rayonnante qui pourrait lui être envoyée par le sol échauffé, par des murs frappés par le soleil, etc. — Quand ces précautions ne sont pas observées, il peut arriver que des thermomètres, placés à des expositions diverses, indiquent au même instant des températures très différentes (**).

(*) Pour la météorologie, la plupart des modifications par lesquelles nos dernières éditions diffèrent des précédentes sont dues à M. E. Nouel, qui a bien voulu mettre à notre disposition ses connaissances spéciales sur cette partie de la science.

(**) Pour déterminer, avec précision, la température de l'air à un instant déterminé,

Le thermomètre à mercure est celui qu'on emploie de préférence. Dans les régions polaires, où la température s'abaisse au-dessous de — 40°, point de congélation du mercure, on le remplace par le thermomètre à alcool.

Les thermomètres à *maxima* et à *minima* permettent de déterminer les limites extrêmes entre lesquelles a pu varier la température d'un lieu, pendant la durée d'une journée par exemple, sans s'assujettir à suivre, d'une manière continue, la marche des instruments.

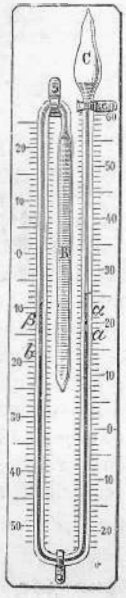


Fig. 671. Thermomètre à maxima et à minima.

Le thermomètre de Six, modifié par Bellani, offre la réunion, dans un même instrument, d'un thermomètre à *maxima* et d'un thermomètre à *minima*. La figure 671 représente cet instrument tel qu'on le construit aujourd'hui. — Le réservoir R et la tige recourbée qui se continue avec lui contiennent de l'alcool jusqu'en *b*; de *b* en *a* est une colonne de mercure; enfin, au-dessus de *a*, et jusqu'à la chambre C, est une seconde colonne d'alcool; à chacune des extrémités *a* et *b* de la colonne de mercure, sont deux petits cylindres d'émail, servant d'index α et β. Lorsque la température s'élève, la dilatation de l'alcool contenu dans le réservoir R et dans la branche de gauche, et celle de la colonne de mercure, ont pour effet de soulever le cylindre α; le cylindre β, maintenu contre la paroi du tube par un petit cheveu qui y est fixé et qui forme ressort, reste immobile au milieu de l'alcool. Lorsque la température s'abaisse, la contraction de l'alcool entraîne la colonne de mercure en sens inverse; c'est le cylindre β qui est soulevé, le cylindre α restant en place. Le cylindre de droite indique donc les *maxima*; celui de gauche, les *minima* : chacune des deux branches porte une échelle indiquant les degrés. — Pour permettre de ramener facilement les index au contact du mercure, on a placé, dans chacun d'eux, une tige de fer très fine, qu'on attire avec un aimant.

Mais, pour que la tige d'un thermomètre puisse livrer passage à un index solide, il faut toujours qu'elle ait un assez grand diamètre intérieur, ce qui permet difficilement de donner à l'instrument une sensibilité suffisante pour des observations précises. Aussi, les météorologistes emploient-ils préférablement, pour la détermination des

il suffit de suspendre un thermomètre à une petite corde, et de le faire tourner vivement comme une fronde, pendant quelques instants. Ce mouvement, en déterminant un renouvellement rapide de l'air autour de l'instrument, l'amène à indiquer une température qui est exactement celle de l'air lui-même.

maxima en particulier, un thermomètre dans lequel on se sert, comme index, d'une très petite colonne de mercure, séparée du reste liquide par une bulle d'air. — Cet instrument est, en réalité, un thermomètre à mercure ordinaire, à tige très fine, et à la partie supérieure duquel on a laissé un peu d'air. Pour le transformer en un thermomètre à maxima, il suffit de faire passer, de la tige dans la chambre supérieure, une gouttelette de mercure : on la fait redescendre ensuite dans la tige, comme si l'on voulait la réunir au reste de la colonne; la réunion est empêchée par la petite quantité d'air qui est restée dans la tige. — Pour mettre l'instrument en expérience, on le place dans une position horizontale, après avoir amené l'index de mercure aussi près que possible de l'extrémité de la colonne. Lorsque la température s'élève, la dilatation de la colonne pousse devant elle l'index; quand la température s'abaisse, l'index reste immobile; on pourra donc lire, au bout d'un temps quelconque, la température la plus haute à laquelle aur été soumis l'instrument.

904. Températures moyennes. — On nomme *température moyenne d'un jour*, en un lieu déterminé, la moyenne des températures observées, d'heure en heure, de minuit à minuit. C'est la somme de 24 observations, divisée par le nombre 24. Dans la plupart des cas, cette moyenne concorde sensiblement avec celle de trois observations, faites, la première au lever du soleil, la seconde à midi, la troisième au coucher du soleil. — Enfin, de Humboldt a montré qu'on obtient encore sensiblement le même nombre, en prenant la moyenne entre la température *maximum* et la température *minimum* du jour. Ces deux températures peuvent être fournies par les indications d'un thermomètre à maxima et d'un thermomètre à minima.

On nomme *température moyenne d'un mois*, la moyenne des températures de tous les jours de ce mois. C'est la somme de 30 ou 31 valeurs numériques, divisée par le nombre 30 ou par le nombre 31.

On nomme *température moyenne d'une année*, la moyenne des températures des mois de cette année : c'est la somme de 12 valeurs numériques, divisée par le nombre 12.

Enfin, on désigne sous le nom de *température moyenne d'un lieu*, la moyenne des températures d'un grand nombre d'années consécutives. — A l'Observatoire de Paris, la moyenne fournie par 50 années d'observations consécutives est sensiblement 10°,80.

905. Variations de la température pendant la durée du jour. — La température la plus basse du jour, en un lieu déterminé, s'observe en général vers le lever du soleil; à partir de ce moment, le thermomètre monte graduellement jusqu'à la température maximum, laquelle s'observe vers deux heures en été, et vers une heure en hiver; il redescend ensuite jusqu'au retour du minimum, et ainsi de suite, pourvu qu'il n'intervienne aucune cause perturbatrice.

Ces résultats, fournis par l'expérience, sont faciles à expliquer. — Le soleil, depuis son lever jusqu'à midi, s'élève de plus en plus au-dessus de l'horizon : donc, d'une part, l'inclinaison des rayons solaires diminuant, la quantité de chaleur qui tombe sur une surface déterminée augmente ; d'autre part, ces rayons ayant à parcourir dans l'atmosphère un trajet moins long, l'absorption qu'ils y éprouvent est diminuée : pour ces deux raisons, la terre reçoit plus de chaleur qu'elle n'en perd par rayonnement, et sa température va en croissant. — A partir de midi, la hauteur du soleil au-dessus de l'horizon diminue, et la quantité de chaleur que reçoit la terre décroît ; toutefois, pendant quelque temps, cette quantité est encore supérieure à celle qui est émise par le rayonnement, et la température continue à s'élever. Enfin, il arrive un moment où la perte de chaleur devient égale au gain : la température devient alors stationnaire. — Puis, jusqu'au coucher du soleil, la température s'abaisse, parce que la chaleur émise est supérieure à la chaleur absorbée, et le refroidissement s'accélère encore après que le soleil a disparu. — Enfin le soleil reparaît ; la température remonte, et les mêmes phénomènes se reproduisent.

906. Variations de la température pendant l'année. — Si l'on compare entre elles les températures moyennes du jour, aux diverses époques de l'année et pour un même lieu, par exemple pour un point de la France, on observe un minimum vers le premier tiers de janvier, et un maximum vers le milieu de juillet.

C'est là encore un résultat facile à concevoir. — On sait que, pour notre hémisphère, le rapport de la durée du jour à celle de la nuit est minimum au 21 décembre (solstice d'hiver), et va en augmentant depuis cette époque jusqu'au 21 juin (solstice d'été) ; en outre, entre ces deux époques, la hauteur du soleil à midi devient toujours de plus en plus grande. Donc, à mesure qu'on s'approche du 21 juin, la quantité de chaleur reçue par la Terre en vingt-quatre heures augmente, et la moyenne du jour s'élève ; elle continue à s'élever tant que la quantité de chaleur absorbée est supérieure à la quantité de chaleur émise. — A partir de la mi-juillet, la moyenne du jour s'abaisse, parce que la quantité de chaleur reçue en vingt-quatre heures décroît de plus en plus, et cet abaissement se continue quelques jours encore après le 21 décembre.

907. Délimitation des saisons météorologiques. — On considère, en météorologie, le mois le plus chaud, c'est-à-dire le mois de juillet, comme le milieu de l'été. Alors l'*été*, au lieu d'avoir les limites assignées en astronomie, savoir le 21 juin et le 22 septembre, comprend les mois de *juin*, *juillet*, *août*. — De même, le milieu de l'hiver est formé par le mois de janvier, et l'*hiver* comprend les mois de *décembre*, *janvier*, *février*. — Le *printemps* et l'*automne* comprennent les mois intermédiaires entre les deux autres saisons.

Cela posé, si l'on prend, en un lieu déterminé, la moyenne des trois mois de l'été, pendant plusieurs étés consécutifs, la moyenne des moyennes ainsi obtenues constituera ce que l'on nomme la *température moyenne de l'été* pour ce lieu. — On obtiendra de même la *température moyenne de l'hiver*, pour un lieu déterminé.

908. Influence de l'altitude sur la température. — Les observations faites sur les montagnes, ou dans les ascensions aérostatiques, montrent que la température décroît à mesure qu'on s'élève au-dessus de la surface du globe. — La loi de cette décroissance n'est connue qu'imparfaitement, et paraît dépendre de conditions diverses : cependant on a observé, en général, un abaissement de température de 1 degré pour un accroissement d'*altitude* d'environ 180 mètres (*).

Lorsque, en gravissant une montagne, on observe les changements successifs qu'éprouve la végétation, on trouve que ce sont précisément ceux qu'on rencontrerait en partant du pied de la montagne, et se dirigeant, à travers les pays de plaines, vers le pôle. Ainsi, en gravissant le Chimboraço, qui est situé dans la chaîne des Andes, au voisinage de l'équateur, on trouve d'abord la végétation propre aux régions équatoriales, puis celle de la zone torride, celle des zones tempérées, celle des zones glaciales, et la région des neiges perpétuelles.

Enfin, l'observation montre, ainsi qu'il était facile de le prévoir, que la limite inférieure des neiges perpétuelles se trouve, sur les diverses montagnes, à une hauteur d'autant moindre que la montagne est à une latitude plus élevée. Ainsi, à Quito, dans le voisinage de l'équateur, cette limite est à 4800 mètres ; dans les Alpes, à 2700 mètres; dans les montagnes de l'Islande, à 936 mètres.

909. Lignes représentant la distribution des températures à la surface du globe. — Pour rendre facilement saisissable la distribution des températures moyennes à la surface du globe, de Humboldt a eu l'idée de construire, sur la sphère, des lignes qui réunissent les points présentant des valeurs égales pour les moyennes de même espèce. — On a construit trois systèmes de lignes :

1° Les *lignes isothermes* (ἴσος, égal; θερμός, chaleur), qui réunissent les points offrant la même température moyenne de l'année;

2° Les *lignes isothères* (ἴσος, égal; θέρος, été), qui réunissent les points offrant la même température moyenne de l'été ;

(*) Ce chiffre ne s'applique qu'à la température *moyenne* des points situés à des hauteurs différentes au-dessus de la mer. Une foule de circonstances accidentelles modifient la loi de distribution de la température, à un moment donné, sur les différents points d'une même verticale.

Quant à la raison qui détermine cette décroissance, il faut la chercher dans la Théorie Mécanique de la chaleur. Une masse d'air, en s'élevant, se refroidit par la détente qu'elle éprouve : elle s'échauffe, au contraire, en descendant et en se comprimant. On a pu calculer, d'après cela, la loi théorique de la variation de la température dans l'atmosphère : on a trouvé précisément un abaissement de température de 1 degré pour un accroissement de hauteur de 180 mètres.

3° Les *lignes isochimènes* (ἴσος, égal ; χειμών, hiver), qui réunissent les points offrant la même température moyenne de l'hiver (*).

La figure 672 représente ces trois systèmes de lignes en Europe, pour les températures successives de 5 en 5 degrés. On verra plus loin comment on peut s'expliquer les irrégularités qu'elles présentent.

910. Climats. — On nomme *climat* d'un lieu, l'ensemble des conditions météorologiques auxquelles ce lieu est soumis dans l'intervalle d'une année.

Si nous nous bornons, pour le moment, aux conditions de température, on voit immédiatement que la connaissance de la ligne isotherme qui passe par le lieu considéré donne la moyenne des températures qui s'y succèdent dans l'espace d'une année. — Mais cette moyenne peut être fournie par des températures qui varient entre des limites extrêmement différentes. Considérons, par exemple, la ligne isotherme de + 10° (*fig.* 672), qui traverse la mer Caspienne, le nord de l'Allemagne, la Hollande, l'Angleterre, et vient passer au sud de l'Écosse. En tous les points de cette ligne, la température moyenne de l'année est la même : cependant il s'en faut de beaucoup qu'ils offrent, dans le cours de l'année, des températures semblables. En effet, la figure montre que les bords septentrionaux de la mer Caspienne sont compris entre la ligne isothère de + 25° et celle de + 20° ; qu'ils sont coupés par la ligne isochimène de — 5° ; la moyenne de l'été y est donc très élevée, et celle de l'hiver fort basse. Au contraire, le sud de l'Irlande est coupé par la ligne isothère de + 15° et par la ligne isochimène de + 5°, en sorte que la moyenne de l'été et la moyenne de l'hiver sont toutes deux des températures modérées, s'écartant peu de la moyenne annuelle. Ces deux régions, situées sur une *même ligne isotherme*, sont donc cependant dans des conditions très différentes de température. Ces remarques sont tout à fait générales (**).

On distingue généralement trois variétés de climats :

1° Les *climats constants*, pour lesquels la température moyenne de l'été ne présente avec celle de l'hiver qu'une différence très petite, de

(*) Il est important de remarquer que les lignes ainsi tracées se rapportent aux moyennes *corrigées*, c'est-à-dire réduites au niveau de la mer. On adopte, pour faire cette correction, le chiffre de 1 degré pour 180 mètres de différence d'altitude (908). Si l'on essayait de tracer les isothermes *vraies* pour un pays, on obtiendrait des lignes ayant les formes les plus capricieuses, et rappelant par leurs dispositions les courbes dites *de niveau* en géodésie.

(**) Pour avoir une idée exacte d'un climat, il est nécessaire d'ajouter à ces déterminations celle de la température *maximum* qui survient au moment le plus chaud de l'été, et celle de la température *minimum* à laquelle le thermomètre peut descendre pendant les jours les plus froids de l'hiver. — Ces températures extrêmes, qui ne sont souvent que passagères, et ne font varier que très peu la moyenne de l'été ou de l'hiver, peuvent avoir cependant sur la végétation une influence considérable, soit en permettant à certains végétaux d'arriver en quelques jours à maturité, soit en faisant périr subitement ceux qui auraient pu vivre pendant le reste de l'année.

6 à 7 degrés au plus. — Ainsi aux îles Canaries, la moyenne de l'été est 25°,4, et celle de l'hiver 18°,0; la différence est donc 5°,8.

2° Les *climats tempérés*, pour lesquels la moyenne de l'été offre avec

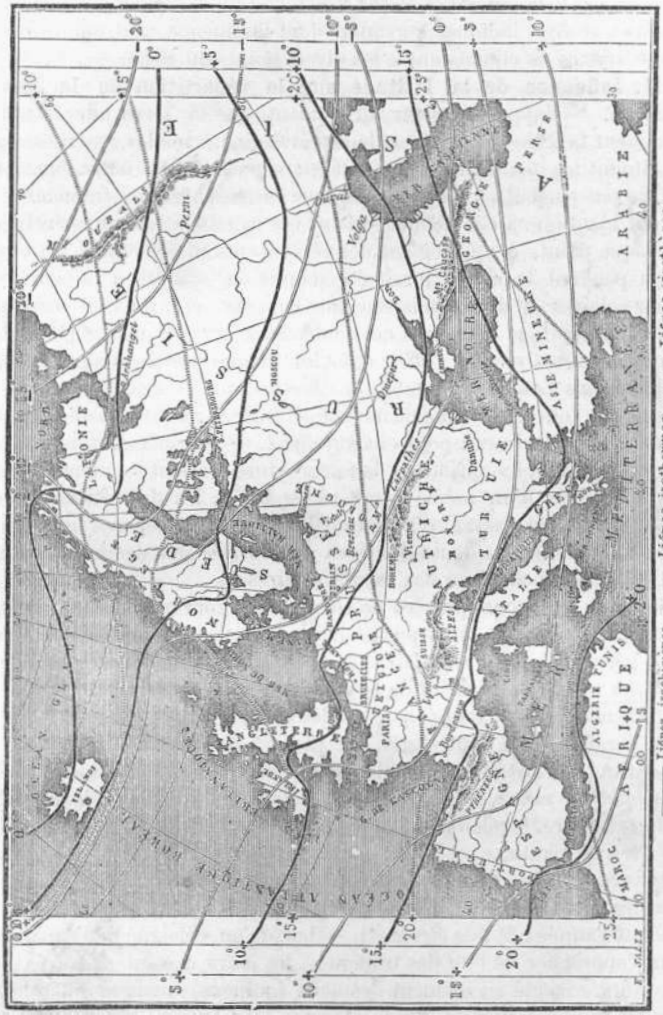


Fig. 672.

celle de l'hiver une différence qui atteint une quinzaine de degrés. — Tel est le climat de Paris, où, la moyenne de l'été étant + 18°,1 et celle de l'hiver + 3°,3, la différence est de 14°,8.

3° Les *climats excessifs*, pour lesquels la différence des moyennes de l'été et de l'hiver est beaucoup plus grande. — Tel est le climat de Moscou, pour lequel, la moyenne de l'été étant + 18°,4 et celle de l'hiver — 9°,1, la différence est de 27°,5.

Il nous reste à indiquer les causes dont l'influence peut déterminer les différences de climats entre les divers points du globe.

911. Influence de la latitude sur la répartition de la température. — Supposons, pour un moment, que la Terre offre rigoureusement la forme d'un ellipsoïde de révolution, sans les aspérités qui constituent les montagnes et les vallées; supposons, en outre, que sa surface soit partout identique; enfin, que l'atmosphère soit immobile et partout identique à elle-même. — Dans ces hypothèses, la température de chaque point, à un moment donné, dépendrait seulement : 1° du temps pendant lequel il aurait été soumis ou soustrait à l'action des rayons solaires; 2° de l'inclinaison sous laquelle ces rayons lui seraient parvenus. Or, tous les points qui sont placés sur un même parallèle viennent successivement s'offrir dans les mêmes positions aux rayons solaires, dans l'espace de vingt-quatre heures : tous ces points présenteraient donc tour à tour une même température, à mesure qu'une même heure du jour arriverait pour chacun d'eux. — De même, pendant le cours de l'année, les variations de température seraient les mêmes pour tous les points d'un même parallèle. — Enfin, les différences qu'on rencontrerait, en passant d'un parallèle à un autre, dépendraient uniquement des changements dans les durées relatives des jours et des nuits et dans l'inclinaison des rayons solaires.

Bien que ces conséquences ne soient pas rigoureusement vérifiées, on conçoit comment on a pu partager la surface du globe en cinq zones géographiques : cette division fournira au moins des indications *générales* sur la distribution de la température. Ces zones sont :

1° La *zone torride*, limitée par les deux tropiques, c'est-à-dire par les deux parallèles qui sont situés, de part et d'autre de l'équateur, à une latitude de 23° 28′. — Pour les points de cette zone qui sont placés *sur l'équateur même*, les jours sont, pendant toute l'année, égaux aux nuits; en outre, le soleil parvient toujours, aux heures voisines de midi, très près du zénith, c'est-à-dire qu'il arrive presque dans la direction de la verticale. De ces deux remarques, on peut conclure que la température des points de l'équateur doit être à la fois : 1° *très uniforme* pendant l'année; 2° *très élevée* (*). — Lorsqu'on s'éloigne de l'équateur pour s'approcher de l'un des tropiques, les jours cessent d'être égaux aux nuits, excepté au moment des deux équinoxes; mais la différence, sous les tropiques mêmes, ne dépasse pas trois heures, aux époques où

(*) A l'île de Singapour, dans l'Inde, la différence entre la moyenne de l'été et celle de l'hiver est de 2 degrés, et la température moyenne annuelle est de 26°,7.

elle est maximum, c'est-à-dire aux époques des deux solstices : le soleil s'élève encore très haut sur l'horizon. La température de ces points doit donc être : 1° un peu *moins uniforme* qu'à l'équateur; 2° un peu *moins élevée* (*).

2° Les deux *zones tempérées*, situées de part et d'autre de la zone torride, chacune d'elles étant limitée, d'une part par l'un des tropiques, de l'autre par le cercle polaire, c'est-à-dire par le petit cercle situé à 23° 28′ du pôle (ou autrement à la latitude de 66° 32′). — Pour les points de ces zones, à mesure qu'on s'éloigne des tropiques, la différence des jours et des nuits atteint une valeur maximum d'autant plus considérable, et la hauteur maximum du soleil au-dessus de l'horizon devient d'autant moindre, qu'on s'approche davantage des cercles polaires. L'été peut encore être assez chaud, parce que la longueur des jours compense, jusqu'à un certain point, l'obliquité que présentent, même à cette époque, les rayons solaires; mais l'hiver devient froid, parce que l'époque de la durée maximum des nuits coïncide avec celle de l'obliquité maximum des rayons solaires. — De là résulte que, en s'éloignant du tropique, on doit rencontrer : 1° une température *de plus en plus variable* pendant la durée de l'année; 2° une température moyenne *de plus en plus basse*. Le climat, d'abord tempéré, devient bientôt excessif, et la moyenne annuelle descend à des valeurs très faibles (**).

3° Les deux *zones glaciales*, comprises chacune entre l'un des cercles polaires et le pôle correspondant. — Dans ces zones, la durée maximum de la nuit, qui correspond à l'un des solstices, est de vingt-quatre heures pour les points situés sur les cercles polaires eux-mêmes, et devient de plusieurs semaines ou de plusieurs mois à mesure qu'on s'approche des pôles : il est vrai que la durée maximum du jour, qui correspond à l'autre solstice, acquiert les mêmes valeurs; mais le soleil n'atteint jamais au-dessus de l'horizon qu'une faible hauteur. Enfin, aux pôles mêmes, l'année se compose d'une nuit de six mois, et d'un jour de six mois pendant lequel le soleil monte lentement au-dessus de l'horizon et n'atteint qu'une hauteur maximum de 23° 28′ à l'époque du solstice. — Dès lors, la température de ces contrées, extrêmement basse pendant les plus longues nuits, ne peut atteindre qu'une moyenne très peu élevée pendant les plus longs jours. C'est la région des glaces perpétuelles, dont les limites varient un peu avec les saisons, mais qui s'étendent toujours jusqu'à une grande distance des pôles.

(*) A la Havane, dans les grandes Antilles, c'est-à-dire à peu près sous le tropique du Cancer, la différence des moyennes de l'été et de l'hiver est de 5°,1 et la moyenne annuelle est d'environ 25°.

(**) Aux îles Canaries, la différence entre la moyenne de l'été et celle de l'hiver est d'environ 6°; et la moyenne annuelle est de 21°,8. — A Bordeaux, la différence entre l'été et l'hiver est près de 16°, et la moyenne annuelle est de 13°,9. — A Stockholm, la différence entre l'été et l'hiver est de 20°, et la moyenne annuelle est de 5°,8.

912. Des causes qui modifient la répartition des climats. — Si la Terre et l'atmosphère terrestre satisfaisaient aux hypothèses que nous avons faites sur leur constitution (911), toutes les lignes qui représentent des moyennes de température se confondraient avec des parallèles de la sphère. Or, l'inspection de ces lignes (*fig.* 672) montre qu'il n'en est pas ainsi. — Nous allons montrer que l'on peut trouver, dans les conditions physiques auxquelles sont soumises les différentes contrées, les causes les plus importantes de ces variations.

913. Influence de la proximité ou de l'éloignement des côtes. — Climats maritimes et continentaux. — Les eaux possèdent, pour la chaleur, un pouvoir absorbant et un pouvoir émissif moindres que la terre ferme : par suite, toutes choses égales d'ailleurs, elles absorbent ou émettent des quantités de chaleur moindres. — Elles ont, en outre, une chaleur spécifique plus grande, de sorte que, pour une même quantité de chaleur absorbée ou émise, elles éprouvent ausssi une moindre variation de température. — Enfin, une partie de la chaleur qu'elles absorbent est employée à former des vapeurs. — Pour ces diverses raisons, l'échauffement ou le refroidissement est plus lent pour les grandes étendues d'eau que pour la terre ferme.

A ces causes, il faut ajouter l'influence de la vapeur d'eau dans l'atmosphère, au voisinage des mers, et surtout celle des nuages qui sont toujours plus fréquents au voisinage des côtes : ils tempèrent l'ardeur du soleil pendant le jour, et diminuent la perte de chaleur qu'éprouve la terre par rayonnement pendant la nuit.

De là, des différences très grandes entre les températures des continents et celles des mers, sous la même latitude. La figure 672 montre en effet que, au voisinage des mers, les lignes isothères qui traversent des continents s'abaissent vers l'équateur, et qu'au contraire les lignes isochimènes se relèvent vers le pôle ; il en résulte que, sous une même latitude, les climats sont beaucoup *moins variables* sur les côtes que dans l'intérieur des continents.

Ce sont ces remarques qui ont donné lieu aux dénominations de *climats maritimes* et *climats continentaux*, les premiers étant en général des climats tempérés, tandis que les seconds peuvent être, sous les mêmes latitudes, des climats excessifs. — Ainsi, la différence entre la température moyenne de l'été et celle de l'hiver est de 11 degrés à Cherbourg, de 15 degrés à Paris, de 20 degrés à Vienne, bien que les latitudes de ces points soient sensiblement les mêmes.

Enfin, les climats les plus constants sont les *climats insulaires*. — Ainsi, dans les îles de la zone tropicale, la différence entre la moyenne de l'été et celle de l'hiver ne dépasse guère 2 ou 3 degrés.

914. Rapports qui existent entre les lignes de température et les limites de certains végétaux. — On conçoit que, parmi les plantes cultivées, celles qu'on sème pour les récolter au bout de quelques mois peuvent

arriver à maturité partout où la température moyenne de l'été est assez élevée, quelle que soit d'ailleurs la température de l'hiver. Aussi observe-t-on, par exemple, que la culture des orges, en Europe, est limitée au nord par une ligne voisine de la ligne isothère de 10 degrés (*fig.* 672), et celle des froments par une ligne voisine de la ligne isothère de 15 degrés. Les points traversés par ces lignes ont cependant des climats différents, et, pendant l'hiver, des températures très inégales. De même, le maïs n'exige guère que deux ou trois mois de température un peu élevée pour arriver à maturation : sa limite de culture se rapproche beaucoup de la ligne isothère de 20 degrés. — Il en est à peu près de même des végétaux vivaces qu'on cultive pour leurs fruits : la culture en est répandue seulement dans les points où ces fruits peuvent arriver à maturité, c'est-à-dire où la température de l'été est assez élevée. Aussi, les limites de culture des vignes, des oliviers, des orangers, affectent-elles encore des formes voisines de celles des lignes isothères.

Au contraire, les limites de végétation des arbres forestiers dépendent des températures de l'hiver, c'est-à-dire qu'elles suivent les lignes *isochimènes*. — Ainsi, la limite de végétation du chêne vert se rapproche de la ligne isochimène de + 5 degrés; elle correspond à une latitude assez basse dans les continents orientaux, mais elle s'élève brusquement vers le midi de la France, et suit la côte de l'Océan jusque dans la Bretagne. — Des remarques analogues sont applicables aux autres arbres forestiers, dont les limites de végétation s'élèvent d'autant plus en latitude qu'ils peuvent supporter des hivers plus rigoureux.

En résumé, l'*ensemble* de la végétation d'une contrée dépend, à des titres différents, des températures de l'été et des températures de l'hiver, ou des lignes *isothères* et des lignes *isochimènes* entre lesquelles cette contrée est comprise.

II. — DES VENTS.

915. Causes principales des vents. — La production des vents se relie intimement aux variations de température. Elle peut dépendre de causes diverses : nous indiquerons les principales.

Lorsqu'une région a été fortement échauffée, les couches d'air voisines du sol s'élèvent, en vertu de leur diminution de densité; ces couches sont remplacées par l'air froid qui afflue des régions voisines. De là, un vent qui souffle, à la surface du sol, des régions plus froides vers la région considérée. Quant à l'air chaud qui s'est élevé, il se déverse ensuite par les régions supérieures vers les parties froides, et produit ainsi, dans les hautes régions de l'atmosphère, un vent en sens contraire (*).

(*) On peut mettre en évidence ce double mouvement, au moyen d'une expérience imaginée par Franklin. Si l'on ouvre la porte d'une chambre chauffée, donnant sur un espace froid, et si l'on place une bougie allumée au niveau du sol, on constate immédiatement, par le mouvement de la flamme, l'existence d'un courant d'air, venant du dehors vers la chambre. Si l'on place, au contraire, la bougie vers le haut de l'ouverture de la porte, on constate un mouvement inverse de l'air chaud, de l'intérieur de la chambre vers le dehors.

Le même effet peut se produire encore par suite d'une différence dans l'état hygrométrique de deux masses d'air voisines, un mélange d'air et de vapeur d'eau étant moins dense que de l'air sec, à la même température et à la même pression.

Ces différences de densités, dues à l'action du soleil, sont les causes les plus générales des vents. Il en résulte un échange continuel de courants atmosphériques, surtout entre les mers et les continents, de sorte qu'on peut dire que l'atmosphère ne reste jamais en équilibre. Les calmes momentanés qu'on observe, en certains points et à certains instants, correspondent à des moments d'arrêt qui précèdent ordinairement les changements de direction du vent.

Enfin, des coups de vent violents peuvent résulter du vide produit, en un point de l'atmosphère, par la condensation subite d'une grande quantité de vapeur d'eau, comme cela a lieu dans les orages : l'air des régions voisines se précipite dans cet espace où la pression est moindre. — Il peut même arriver que le phénomène se propage, de proche en proche, *au rebours de la direction du vent.* C'est ce que Franklin avait constaté dans certains cas : il avait donné à ces vents le nom de *vents d'aspiration.* Mais ce sont les plus rares, la transmission de pression se faisant généralement plus vite que le mouvement de transport de l'air.

916. Vents périodiques. — Brises. — Moussons. — Parmi les vents périodiques, on peut citer les *brises,* qu'on observe sur les côtes, et qui affectent deux directions différentes dans le cours d'une même journée. — La *brise de mer* souffle le matin, quelque temps après le lever du soleil; c'est sur cette brise que les marins comptent pour entrer dans les ports. On s'explique la production de ce vent, en remarquant que la terre s'échauffe, sous l'influence des rayons solaires, plus vite que la surface de la mer (913) : donc, tant que la température continue à croître, il s'établit au-dessus de la terre une colonne d'air ascendante, qui appelle l'air de la mer. Dans notre zone tempérée, c'est surtout pendant l'été que la brise de mer est sensible : elle commence à diminuer vers trois ou quatre heures du soir, et cesse au coucher du soleil. — Alors, survient la *brise de terre,* ou brise du soir, qui dure jusqu'au lever du soleil, et que les marins peuvent utiliser pour sortir du port : la terre se refroidissant plus vite que la mer, c'est alors l'air de la côte qui descend, pendant que l'air de la mer s'élève pour lui faire place.

Les *moussons* sont des vents périodiques qui s'observent surtout dans la mer des Indes; ils règnent pendant six mois consécutifs dans un sens, et pendant les six autres mois en sens contraire. La *mousson de printemps* commence au mois d'avril, c'est-à-dire à l'époque où la température moyenne du continent commence à devenir plus élevée que celle de la mer; aussi est-ce un vent de mer, qui se continue jus-

que vers le mois d'octobre. A cette époque, survient la *mousson d'automne*, qui souffle du continent tant que la température moyenne du sol décroît plus vite que celle des mers. — Dans la mer des Indes, la mousson de printemps vient du sud-ouest, la mousson d'automne vient du nord-est : on peut facilement s'en rendre compte par la configuration des mers et des continents voisins (*).

917. Vents constants. — Alizés. — Les seuls vents constants sont les *vents alizés*, qui soufflent toute l'année dans le voisinage de l'équateur, et dont l'influence se fait sentir à une très grande distance. — Voici la théorie qui en a été donnée par Halley.

Dans les régions intertropicales, la température moyenne du jour est plus élevée que sous les autres latitudes (911) : elle est d'environ 28 degrés pendant toute l'année. De plus, les eaux occupant dans cette zone une étendue considérable, il se produit en ces points une évaporation extrêmement active. Ces deux causes diminuent la densité de l'air et déterminent une ascension des couches inférieures, qui sont remplacées par de l'air affluant des régions tempérées. Donc, si la Terre était immobile, il se produirait, à sa surface, des courants dirigés *de chacun des pôles vers l'équateur*. — Mais la Terre tourne autour de la ligne des pôles, et les vitesses de ses différents points sont d'autant plus grandes qu'ils sont plus rapprochés de l'équateur; d'autre part, l'air qui touche chaque point du globe est animé de la même vitesse de rotation que ce point lui-même. Donc, quand une masse d'air, ayant séjourné au contact des zones tempérées, a acquis la vitesse de rotation de ces régions, et que cet air vient ensuite à affluer vers les tropiques, il est animé d'une vitesse de rotation moindre que celle des points des tropiques : il reste, pour ainsi dire, en retard par rapport à ce mouvement de rotation, et il paraît souffler en sens inverse du mouvement de la Terre. Le vent de l'hémisphère boréal est donc ainsi transformé en un vent de *nord-est*; le vent de l'hémisphère austral, en un vent de *sud-est*. — Ces deux vents se combinent en arrivant sur l'équateur, où ils produisent un vent d'*est*.

On voit de plus que, si cette explication est exacte, il doit exister,

(*) C'est encore à des causes du même ordre qu'on doit rapporter le *mistral*, qui souffle dans le Midi de la France et qui est un vent de nord-ouest. — On se rend compte assez facilement de la production du mistral de la Provence : les plaines basses et sablonneuses de la Crau, de la Camargue et des Bouches-du-Rhône, échauffées par le soleil ardent de l'été, déterminent une ascension des couches d'air qui les touchent, et un appel continu de l'air des régions voisines. Cet air ne peut venir de l'est, où il est arrêté par la chaîne des Alpes : il arrive donc du nord et de l'ouest, et en particulier du plateau central de la France. — On peut remarquer enfin que ces masses d'air, qui ont passé sur les hauteurs du Cantal et de l'Auvergne, où elles se sont refroidies et ont abandonné une partie de leur humidité, arrivent alors dans des régions plus chaudes, et se trouvent ainsi très éloignées de leur point de saturation On conçoit donc que le mistral soit l'un des vents les plus desséchants qu'on observe en Europe.

outre les courants que nous venons de signaler à la surface de la Terre, des *contre-alizés supérieurs*, allant de l'équateur vers les pôles. Ces courants, arrivant au-dessus des régions tempérées avec une vitesse de rotation plus grande que celle de ces régions, doivent produire, dans les parties supérieures de l'atmosphère, un vent de *sud-ouest* pour l'hémisphère boréal, un vent de *nord-ouest* pour l'hémisphère austral. — Ces contre-alizés, qui règnent au-dessus des alizés inférieurs, ont pu en effet être constatés, soit par la direction dans laquelle ils transportent des nuages élevés et les cendres de certains volcans, soit par l'observation directe du vent qui règne au sommet des montagnes élevées, sur le pic de Ténériffe, par exemple.

918. Influence des contre-alizés et du Gulf-stream sur la température de l'Europe. — Les contre-alizés dont il vient d'être question, et qui s'observent dans la partie boréale de l'océan Atlantique, ont une influence considérable sur le climat de l'Europe occidentale. Ces courants équatoriaux, de direction sud-ouest, après avoir régné dans les régions supérieures, viennent, en s'abaissant, atteindre la surface du globe à des distances variables de leur point de départ : c'est à eux qu'on doit attribuer la prédominance du vent de sud-ouest dans l'Europe occidentale, notamment en Angleterre, dans les Pays-Bas, et en France à partir de la région méditerranéenne. — Ces vents du sud-ouest n'atteignent notre continent qu'après avoir passé au-dessus d'une partie de l'océan Atlantique qui est traversée par le *Gulf-stream*, ce grand courant d'eau tiède qui est indiqué sur toutes les cartes, et qui, partant du golfe du Mexique, vient, avec une direction sud-ouest, atteindre l'Europe occidentale et se faire sentir le long des côtes de Norwège jusqu'au delà du cap Nord (*). On comprend donc que ces vents empruntent à la surface de la mer sa température et son humidité, et ramènent, sur les régions qu'ils traversent, la pluie et une température modérée.

C'est à ce courant d'eau tiède (le *Gulf-stream*) et à ce courant d'air tempéré et humide (le *courant équatorial* du sud-ouest) que nos pays doivent le climat exceptionnellement doux dont ils jouissent; c'est dans cette circonstance météorologique qu'il faut chercher la cause principale de la richesse de ces régions privilégiées, et de la supériorité des races qui les habitent.

919. Vitesse des vents. — Pour déterminer la vitesse des vents qui soufflent à la surface de la Terre, on emploie de petits moulinets, ou *anémomètres*, à ailettes très mobiles, dont on évalue le nombre de tours au moyen d'appareils compteurs disposés comme celui de la

(*) Le mécanisme de la formation de ce courant est le même que celui des vents alizés, et des contre-alizés. Le Gulf-stream représente, dans l'océan Atlantique, le courant supérieur qui ramène, dans l'atmosphère, l'air chaud de l'équateur vers les pôles, et précisément avec la même direction sud-ouest.

sirène (420). Parfois aussi, on mesure le temps que mettent des poussières légères à franchir des distances connues. — Pour déterminer approximativement la vitesse des vents élevés, on mesure la vitesse de translation de l'ombre formée par les nuages sur le sol (*).

Voici quelques nombres, extraits des tableaux construits par les météorologistes :

	VITESSE DES VENTS	
	PAR SECONDE.	PAR HEURE.
Vent seulement sensible.	1m	3km, 6
Vent modéré.	2	7 2
Vent frais (qui tend les voiles).	6	21 6
Bon frais (bon pour la marche des navires). . .	9	32 4
Vent impétueux.	20	72 0
Grande tempête.	27	97 2
Ouragan	36	129 6
Ouragan renversant les édifices.	46	165 6

920. Trombes — Cyclones. — Le mouvement de l'air, dans une direction donnée, se produit rarement avec une vitesse égale pour tous les points de la masse ; il en résulte, comme dans les cours d'eau, des tourbillons animés de vitesses de rotation plus ou moins grandes, et se transportant en même temps dans le sens du courant général. Ces tourbillons affectent la forme d'entonnoirs, dont la pointe est dirigée vers le sol.

Dans certains cas, le phénomène, qui prend toujours naissance dans les hautes régions de l'atmosphère, est tout à fait local : c'est le phénomène particulier auquel on a donné le nom de *trombe*. On voit alors descendre des nuages une protubérance de matière nimbeuse, qui s'allonge en une sorte de colonne, et vient atteindre la mer ou le sol. Le diamètre de cette colonne peut se réduire parfois à quelques mètres ; d'autres fois, il acquiert plusieurs centaines de mètres. — La vitesse de rotation des couches d'air peut atteindre ou dépasser les plus grandes vitesses de translation du vent ordinaire. C'est ce que démontrent les effets formidables qui signalent parfois le passage des trombes, brisant ou arrachant les plus gros arbres, renversant les édifices ou enlevant les toitures, etc. (**).

Les *cyclones*, les *typhons*, les *tempêtes*, les *ouragans* (***), sont égale-

(*) Les voyages aérostatiques ont permis d'avoir des indications exactes sur la vitesse des vents dans les hautes régions. Le résultat le plus général est que cette vitesse est toujours bien plus considérable que celle du vent qu'on observe, au même instant, à la surface de la Terre ; la différence est due évidemment aux obstacles que rencontre le mouvement de l'air à la surface du sol. C'est pour la même cause que la vitesse du vent est plus grande, en général, à la surface de la mer que sur les continents.

(**) Les *tornados* des régions tropicales, dont la puissance de destruction est terrible, ne sont que des trombes de très grand diamètre.

(***) Ces dénominations assez peu précises ont été données, dans les divers pays, à des phénomènes à peu près identiques. — Le mot *typhon* s'applique plus spécialement aux cyclones de la mer des Indes. — Le nom scientifique qu'on doit donner à ces phénomènes est celui de *cyclones* (de κυκλος, cercle).

ment dus à la rotation rapide d'une masse d'air autour d'un axe vertical; mais alors le phénomène affecte des dimensions tout autres. Ce n'est qu'en réunissant des observations faites sur un certain nombre de points, souvent très éloignés, qu'on a pu arriver à constater le mouvement de rotation de ces masses d'air, qui ont parfois plus de cent lieues de diamètre.

921. Lois des tempêtes. — Les travaux des météorologistes anglais et américains ont conduit à des lois remarquables, sur la constitution et la marche des tempêtes à la surface des grands océans :

1° Les tempêtes résultent d'un *mouvement circulaire* de l'air, autour d'un centre qui se déplace lui-même plus ou moins rapidement : ce sont donc des *cyclones*.

2° Dans l'hémisphère boréal, le mouvement de *translation* des cyclones a lieu suivant des lignes courbes dont la concavité est tournée vers l'est et dont la direction générale est de S.-O. à N.-E., c'est-à-dire la direction des contre-alizés. — Dans l'hémisphère austral, ces courbes de translation présentent une disposition symétrique de la précédente par rapport à l'équateur.

3° Le sens de la *rotation* de l'air autour du centre est toujours de l'E. à l'O. en passant par le N., ou *en sens contraire du mouvement des aiguilles d'une montre*, pour notre hémisphère. — Dans l'hémisphère austral, le sens est inverse, c'est-à-dire que la rotation s'effectue dans le sens du mouvement des aiguilles d'une montre.

Au centre du cyclone, le baromètre est très bas, et l'air est relativement calme; à une certaine distance du centre, la vitesse de rotation de l'air peut devenir redoutable. — D'autre part, la rotation étant accompagnée d'un mouvement de translation de toute la masse, on conçoit que la vitesse absolue du vent ne doit pas être la même des deux côtés d'un observateur placé au centre et regardant dans la direction où le cyclone se transporte. A *droite*, elle est la somme de la vitesse de rotation et de la vitesse de translation; c'est ce côté que les marins appellent le *demi-cercle dangereux*. A *gauche*, elle n'est que la différence entre les deux vitesses; c'est ce qu'on nomme le *demi-cercle maniable*.

Lorsqu'un navire se sent atteint par un cyclone, ce dont il est averti par la baisse rapide du baromètre, il doit immédiatement manœuvrer pour s'éloigner du centre, qui se trouve toujours, pour notre hémisphère, à *sa droite*, lorsqu'il fait face au vent. La règle inverse doit être appliquée dans l'hémisphère austral.

922. Service météorologique international. — Un service de correspondance télégraphique, pour l'échange quotidien des observations météorologiques, est établi aujourd'hui sur toute l'Europe : il a déjà permis d'arriver à des résultats importants, soit au point de vue de la science pure, soit au point de vue des services à rendre à la marine et à l'agriculture. — Voici, d'une manière sommaire, l'organisation

de ce *Service météorologique international*, pour ce qui concerne la France (*).

Le Bureau central météorologique, établi à Paris, reçoit, tous les matins, des stations météorologiques organisées en Europe, les observations faites à sept heures du matin en été et à huit heures en hiver, et comprenant : 1° la hauteur du baromètre ramenée à 0° (247) et *rapportée au niveau de la mer* (**); 2° la température à l'heure indiquée; 3° la direction et la force du vent; 4° l'état du ciel et de la mer; 5° la quantité de pluie tombée la veille. — Ces observations sont reportées, au fur et à mesure de leur réception, sur une carte de l'Europe, à l'aide de signes conventionnels.

La distribution des températures est représentée, d'une manière graphique, par le tracé de *lignes isothermes*. — La répartition des pressions est figurée par des *lignes isobares* (lignes d'égale pression), tracées de 5 en 5 millimètres de mercure.

A l'aide de ces renseignements, le Bureau central établit la *situation générale* : cette situation est résumée en quelques phrases, que l'on place au dessous de la carte des isobares, et qui sont reproduites dans la plupart des journaux quotidiens. — Le Bureau compose enfin des *avis* spéciaux, sur le temps probable de la journée; ces avis sont transmis par le télégraphe, les uns aux divers ports de la Manche, de l'Océan et de la Méditerranée; les autres dans les diverses régions de la France, aux localités qui ont un abonnement à cet effet avec le télégraphe. Les mêmes localités sont munies d'un baromètre métallique (130) qui est exposé aux regards du public (***). C'est au-dessous de ce baromètre qu'on affiche chaque jour la dépêche dont il vient d'être question. On trouve ainsi réunis tous les renseignements qui peuvent servir à asseoir une opinion sur le temps probable de la journée.

923. Bourrasques ou dépressions. — La construction quotidienne des cartes de lignes isobares a mis en évidence des lois importantes, que des observations isolées eussent été incapables de faire connaître. La principale est la *loi des tempêtes*, que nous avons indiquée plus haut (921), et qu'on peut encore énoncer comme il suit :

Le vent souffle généralement en tournant autour du point où le

(*) L'établissement de ce service en France remonte à l'année 1858; il est dû à l'initiative de Le Verrier, alors directeur de l'Observatoire de Paris.

(**) On connaît la hauteur de chaque station au-dessus de la mer, et l'on a calculé une fois pour toutes (131) la quantité dont il faut augmenter la hauteur lue à ce niveau, pour avoir celle que l'on observerait si l'instrument était descendu verticalement jusqu'au niveau de la mer.

(***) Cet instrument ne donne pas la *vraie hauteur* du baromètre du lieu. Il est réglé de telle sorte qu'il indique la hauteur barométrique rapportée *au niveau de la mer*; de cette façon, sa hauteur concorde avec les indications de la dépêche et de la carte qui est affichée dans certaines stations. Il ne faut donc pas comparer un baromètre du lieu avec le baromètre officiel : on trouverait, selon l'altitude du lieu, des écarts plus ou moins considérables, pouvant s'élever à plusieurs centimètres.

baromètre est le plus bas : pour nos latitudes, la rotation a toujours lieu en sens contraire du mouvement des aiguilles d'une montre. La force du vent est d'autant plus grande, que la dépression du baromètre est plus considérable dans le point central.

Nous reproduisons (*fig.* 673), à titre d'exemple, la carte des lignes

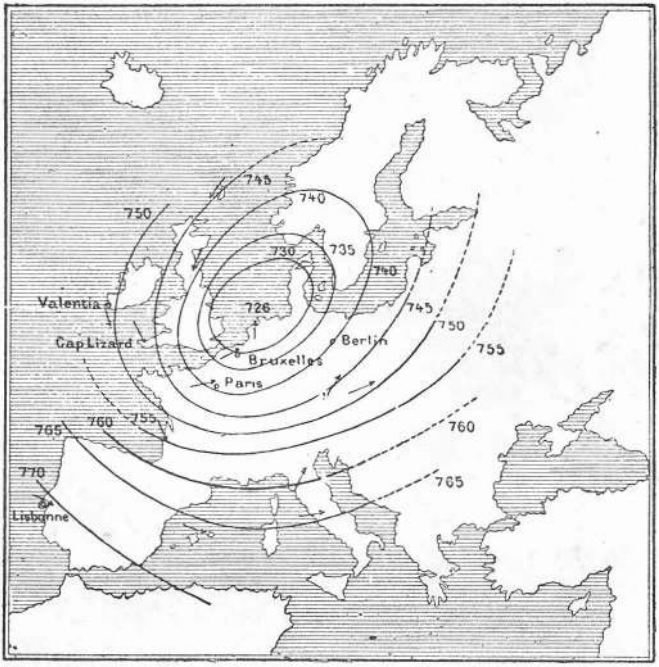


Fig. 673. — Diagramme de la tempête du 9 décembre 1874.

isobares pour le 9 décembre 1874, carte qui montre, d'une manière frappante, les diverses particularités du phénomène.

Ces mouvements tournants, dont l'ensemble constitue ce qu'on a désigné d'abord sous le nom de *bourrasques* et ce qu'on désigne aujourd'hui sous le nom de *dépressions*, se forment toujours sur l'océan Atlantique et se dirigent vers la région de l'Est. Elles abordent l'Europe à des hauteurs diverses, depuis les côtes du Portugal jusqu'au nord de l'Écosse, mais le plus souvent par l'Irlande (à Valentia). La direction suivant laquelle se déplace le point central peut varier du N.-E. au S.-E.; cette marche est connue par la comparaison des cartes des lignes isobares pour deux jours consécutifs. On peut alors annoncer, *à coup sûr*, l'arrivée d'une tempête à tel ou tel port de mer. C'est ainsi que la

bourrasque figurée sur la carte ci-jointe a attaqué l'Irlande le 8 décembre, et que, le lendemain, son centre se trouvait dans la mer du Nord, marchant exactement vers l'est.

On peut dire que le régime météorologique ordinaire de presque toute l'Europe se résume dans le passage d'une série à peu près continue de dépressions successives, venant de l'océan Atlantique, se déformant plus ou moins en chemin, mais se dirigeant généralement *vers l'est* (*). — Cette loi générale est un des éléments qui ont rendu possible la *prévision du temps*, au moins à courte échéance.

III. — OBSERVATIONS BAROMÉTRIQUES.

924. Variations barométriques. — On doit distinguer, dans les mouvements de la colonne barométrique, les variations *régulières* et les variations *accidentelles*.

Dans les contrées tropicales, où les variations accidentelles sont rares, les variations barométriques *régulières* se manifestent avec une grande netteté. Chaque jour, la hauteur barométrique présente deux maxima, qui ont lieu vers dix heures du matin et dix heures du soir, et deux minima, vers quatre heures du matin et quatre heures du soir. La différence de hauteur, de dix heures du matin à quatre heures du soir (grande période), atteint $2^{mm},5$.

Dans nos contrées, les variations *accidentelles* rendent plus difficile la constatation des variations régulières. Mais, si l'on compare entre elles les moyennes calculées chacune *pour une même heure du jour*, par des observations continuées pendant quelques semaines (surtout en été, où les variations accidentelles sont moindres), c'est-à-dire si l'on prend la moyenne des observations faites à midi, puis celle des observations faites à une heure, et ainsi de suite, on voit apparaître les variations *régulières*. — On reconnaît alors que les maxima et les minima ont lieu à peu près aux mêmes heures que dans les régions tropicales; ces heures changent seulement un peu avec les saisons. — Quant à la valeur absolue de la variation (grande période), elle diminue à mesure que la latitude augmente. A Paris, sa valeur moyenne est de $0^{mm},8$.

Les variations accidentelles sont fréquentes dans l'Europe occidentale; elles sont plus grandes en hiver qu'en été. Elles peuvent atteindre 50 millimètres d'amplitude, dans les cas extrêmes, lors du passage des *grandes bourrasques* ou cyclones venant du sud.

(*) Le bassin de la Méditerranée échappe souvent à l'action de ces dépressions : aussi le régime climatérique de cette région diffère-t-il essentiellement de celui du reste de l'Europe.

925. Relations des variations barométriques avec les variations de température et avec les météores aqueux. — Les variations de la température, et les fluctuations qu'elles déterminent dans l'atmosphère, sont les causes immédiates des oscillations du baromètre. — Si, en un lieu déterminé, une dilatation de l'air, due à un accroissement de température, donne lieu à un mouvement d'ascension, il se produit, par cela même, une diminution de pression dans le lieu considéré. — Pour une raison semblable, un vent chaud et humide, au moment où il se fait sentir en un point du globe, fait baisser le baromètre. Au contraire, un vent sec et froid fait monter le baromètre. — On comprend donc qu'il existe, dans chaque contrée, une relation entre les oscillations du baromètre d'une part, les variations de la température et de la direction des vents régnants de l'autre.

Ainsi, dans nos contrées, les vents humides et chauds du sud-ouest, qui déterminent un abaissement de la colonne barométrique, sont précisément ceux qui amènent le plus ordinairement la pluie. Au contraire, les vents secs et froids du nord-est, qui font monter le baromètre, amènent presque toujours le beau temps. — On en peut conclure que, *en général*, dans les contrées offrant une situation géographique analogue à la nôtre, un abaissement de la colonne barométrique est un indice probable de pluie, tandis qu'une ascension du sommet de la colonne est un présage de beau temps (*).

926. — Moyenne barométrique d'un lieu. — Influence de la position géographique. — En un lieu déterminé, la moyenne des hauteurs barométriques observées d'heure en heure, pendant une journée, constitue la *moyenne diurne*. — La moyenne de ces résultats, pour tous les jours d'un mois, donne la *moyenne mensuelle*; avec les moyennes des douze mois, on calcule la *moyenne de l'année*. — Enfin, si l'on combine de même les moyennes de plusieurs années consécutives, on obtient la *hauteur moyenne du baromètre dans ce lieu*.

La hauteur moyenne du baromètre dans un lieu dépend, d'une part de son *altitude*, c'est-à-dire de la hauteur de ce lieu au-dessus du niveau de la mer; d'autre part, de sa *latitude* géographique.

L'influence de l'*altitude*, établie déjà par les expériences de Pascal (117), ressort manifestement de la comparaison des trois moyennes barométriques suivantes, prises dans le voisinage de l'équateur :

Au niveau de la mer.	758^{mm}
A Quito (2908 mètres au-dessus du niveau de la mer). . .	554
A la métairie d'Antisana, près Quito (4101 mètres au-dessus du niveau de la mer).	470

(*) Il faudrait bien se garde der considérer cette règle comme absolue, et surtout de l'étendre à des contrées dont les conditions météorologiques sont différentes. Ainsi, sur la côte orientale de l'Amérique du Sud, à l'embouchure de la Plata, ce sont les vents du sud-est qui amènent la pluie, en même temps qu'ils déterminent, en

L'influence de la *latitude* se manifeste par les observations faites en différents lieux, et *réduites au niveau de la mer*. — A l'équateur, la hauteur moyenne est de 758 millimètres. A mesure qu'on s'éloigne de l'équateur, la hauteur moyenne augmente à partir de la latitude de 10 degrés; elle atteint son maximum, savoir 762 à 764 millimètres, entre le 30e et le 40e degré. A partir de cette zone, elle diminue; vers le 50e degré (c'est-à-dire à peu près la latitude de Paris), elle n'est plus que de 760 millimètres. Enfin, dans les contrées les plus septentrionales, elle descend jusqu'à 756 millimètres environ.

IV. — MÉTÉORES AQUEUX.

927. Variations dans l'état hygrométrique de l'air. — Nous avons montré (517) que le *degré d'humidité* de l'air, à un moment donné, dépend à la fois de la quantité absolue de vapeur d'eau que cet air contient, et de la température de l'atmosphère au même instant.

Dès lors, il est facile de se rendre compte des résultats suivants, fournis par l'expérience. — C'est au lever du soleil que l'air contient la plus petite quantité absolue de vapeur d'eau; cependant, c'est au lever du soleil que l'air est le plus humide, parce que ce moment est celui du minimum de température (905). — Pendant l'été, c'est vers trois heures que l'air est le plus sec : cependant, c'est à ce moment qu'il contient le plus de vapeur d'eau, mais c'est aussi à ce moment que la température est la plus haute. — De même, dans le cours de l'année, c'est vers la fin de décembre que l'air est le plus humide, c'est vers la fin de juillet qu'il est le plus sec : et cependant la quantité de vapeur d'eau est beaucoup moindre en hiver qu'en été.

L'air est rarement *saturé de vapeur*, même lorsqu'il pleut. A la surface de la terre, l'hygromètre à cheveu ne descend presque jamais au-dessous de 40 degrés. La moyenne annuelle de ses indications, dans nos climats, est d'environ 72 degrés, ce qui correspond à une fraction de saturation de 0,50.

928. Rosée. — On donne le nom de *rosée* à ces gouttelettes d'eau qui couvrent, après les nuits calmes et sereines, les corps placés à découvert sur la surface du sol.

La théorie suivante, publiée à Londres en 1815 par Wells, rend compte de ce phénomène. — Lorsque le ciel est serein, et que le soleil a disparu sous l'horizon, la surface du sol et les corps qui y sont placés continuent à rayonner vers les espaces célestes; la chaleur que ces corps perdent ainsi ne peut leur être restituée par les couches profondes, puisque le sol est mauvais conducteur : leur température

raison de leur basse température, une ascension de la colonne barométrique; dans cette contrée, la relation entre l'état du ciel et la hauteur du baromètre est donc inverse de ce qu'elle est chez nous.

s'abaisse donc rapidement. Cet abaissement de température est toujours plus considérable que celui de l'air, dont le pouvoir émissif est beaucoup moindre : en effet, Wells a constaté qu'un thermomètre placé sur le gazon, pendant une nuit sereine, marquait une température inférieure de 5 à 6 degrés, à celle d'un thermomètre suspendu à 1 mètre au-dessus du sol. De là résulte que la couche d'air qui est en contact immédiat avec la surface de la terre est amenée à une température plus basse que les couches plus élevées, et, si la vapeur qu'elle contient n'est pas trop éloignée de son point de saturation, il arrive un moment où elle se condense : la rosée apparaît.

Cette théorie est confirmée par toutes les particularités que présente le phénomène. — Nous indiquerons les principales.

Un vent léger favorise, en général, la formation de la rosée, en renouvelant lentement les couches d'air, qui apportent successivement la vapeur qu'elles contiennent. — Un vent fort rend impossible tout dépôt de rosée : l'air, rapidement renouvelé, réchauffe le sol par son contact, sans se refroidir d'une manière sensible. — Enfin, c'est quand il règne un vent léger et humide que la rosée est surtout abondante : l'observation montre que le vent le plus favorable à la production de la rosée, en France, est le vent du sud-ouest, qui a passé sur des mers étendues et relativement chaudes.

La présence de nuages, le voisinage d'abris masquant une partie du ciel, comme les arbres ou les édifices élevés, sont autant de causes qui diminuent la quantité de rosée ou en empêchent la formation. On voit que, dans ce cas, l'échange de chaleur, au lieu de se faire entre le sol et les espaces célestes qui sont à une température très basse, se fait entre le sol et des corps qui sont à une température voisine de la sienne ; le refroidissement doit donc être beaucoup moins considérable. Wells a constaté qu'un thermomètre placé sur l'herbe, au-dessous d'un mouchoir supporté par quatre piquets, marquait une température supérieure de quelques degrés à celle d'un thermomètre semblable, placé à côté, mais à ciel découvert.

Enfin, les corps qui ont un pouvoir émissif considérable et une faible conductibilité, comme le bois, les feuilles, la terre, sont ceux où la rosée se dépose en plus grande abondance. Le dépôt de rosée est à peu près insensible sur les métaux polis, qui ont à la fois un pouvoir émissif très faible et une grande conductibilité.

929. Gelée blanche. — On désigne sous le nom de *gelée blanche*, un dépôt de glace, en petits cristaux, qu'on observe quelquefois sur les herbes et autres corps, à la surface du sol, après les nuits claires. — La gelée blanche se forme dans les mêmes circonstances que la rosée, surtout au printemps et en automne. En effet, si la température de l'air n'est que de quelques degrés *au-dessus de* 0°, par un ciel serein, la température du sol, qui lui est inférieure de 5 à 6 degrés en moyenne

(928), peut s'abaisser à quelques degrés *au-dessous de* 0°; alors, la condensation de l'humidité, au lieu de se faire sous forme de gouttelettes liquides, donne naissance à de petites aiguilles de glace, qui hérissent la surface des objets refroidis.

Les gelées blanches qui surviennent à la fin d'avril ou au commencement de mai sont particulièrement funestes aux arbres fruitiers : les bourgeons qui sont déjà développés ne tardent pas à se faner et à *roussir*. De là le nom de *lune rousse*, qui a été donné à la lune d'avril, c'est-à-dire à celle qui commence en avril pour se terminer en mai (*). — Les habitants des campagnes ont observé, en effet, que c'est *lorsque la lune brille*, c'est-à-dire lorsque le temps est pur, que ces gelées tardives sont surtout à craindre; mais il serait absurde de croire que c'est la lune elle-même qui produit ces effets sur les végétaux.

930. Givre ou frimas. — Le brouillard possède la propriété, signalée sans explication par de Saussure en 1785, de pouvoir exister dans une atmosphère bien au-dessous de 0°, sans se congeler. On peut observer souvent qu'il en est ainsi, en hiver, à la surface du sol, et les nuages donnent lieu à une observation analogue. — C'est là un phénomène de surfusion. Les gouttelettes très fines du brouillard, en suspension dans l'air, se trouvent, en effet, absolument dans les conditions que M. Dufour a réalisées dans les gouttes d'eau en équilibre au milieu d'un autre liquide (259). M. Dufour a montré que, dans ce cas, le point de congélation pouvait être retardé jusqu'à près de — 20°, pour les plus petites de ces gouttes. La même limite paraît devoir être adoptée pour les globules du brouillard : Fournet a vu en effet du brouillard non gelé à — 15° et — 14°, et M. E. Renou à — 21°,7.

Lorsque des gouttelettes liquides en surfusion viennent à rencontrer un corps solide dont la température est inférieure à 0°, la surfusion cesse, et la cristallisation se produit. C'est ainsi que se forme le *givre* ou *frimas*, qui consiste en un dépôt de glace cristallisée, s'effectuant à la surface des objets placés sur le sol. — Lorsque le dépôt a lieu par un brouillard coïncidant avec une température de plusieurs degrés au-dessous de 0°, il peut devenir assez considérable pour faire rompre les branches des arbres ou les fils des télégraphes.

931. Brouillards. — Nuages. — On donne le nom de *brouillard*, au résultat de la condensation de la vapeur d'eau au voisinage du sol : cette eau forme alors une multitude de gouttelettes fines, qui donnent à l'air une opacité plus ou moins grande. Elles demeurent soutenues dans l'atmosphère, par les courants d'air chaud provenant du sol. — Quand ces amas de gouttelettes occupent des régions plus élevées de l'atmosphère, ils constituent les *nuages*.

(*) On sait que l'*âge de la lune* se compte depuis une nouvelle lune jusqu'à la suivante.

Cette assimilation entre les brouillards et les nuages est justifiée par les observations directes. L'observateur placé dans la vallée voit souvent des nuages courir sur les flancs des montagnes ; ces nuages ne sont que des brouillards, pour un observateur placé à la hauteur. De même, dans les ascensions en ballon, l'aéronaute qui traverse les nuages se trouve plongé dans un brouillard plus ou moins épais.

La cause générale de la production des brouillards ou des nuages est le refroidissement d'une masse d'air déjà voisine de son point de saturation. — C'est ainsi qu'il se forme des brouillards à la fin des nuits de printemps ou d'automne, dans les vallées contenant des cours d'eau, lorsque l'air humide arrive au contact des flancs refroidis de la vallée. — C'est ainsi encore qu'il se forme des nuages, lorsque la vapeur d'eau qui se dégage d'un sol échauffé et humide arrive dans les couches élevées de l'atmosphère, où la température est plus basse. — Lorsqu'un vent chaud et humide vient à souffler sur des régions qui ont été soumises antérieurement à un froid prolongé, il y a condensation de la vapeur et formation de brouillards. C'est ce qu'on observe dans les moments de dégel, par exemple.

C'est par des considérations de ce genre qu'on s'explique comment les vents d'*ouest*, en France, amènent généralement la pluie. Ces vents se sont chargés d'humidité en passant sur l'Océan : à mesure qu'ils pénètrent sur le continent, dont les reliefs deviennent de plus en plus saillants, ils arrivent dans des couches atmosphériques plus froides : l'air humide qu'ils entraînent atteint ainsi bientôt son point de saturation, et il se produit une condensation progressive.

932. Principales espèces de nuages. — Les formes des nuages,

Fig. 674. — Cirrus.

et leurs distances à la terre, sont extrêmement variables : on peut cependant les rapporter à trois types principaux.

On désigne, sous le nom de *cirrus*, les nuages en forme de stries

blanches (*fig.* 674) qui apparaissent au milieu du ciel bleu, et qui signalent généralement la fin d'une période de beau temps. Leur distance à la terre peut atteindre de 9 à 10 kilomètres. — A ces hauteurs considérables, la température est toujours extrêmement basse, même pendant l'été ; aussi, a-t-on pu constater que ces nuages se composent, non pas de gouttelettes d'eau liquide, mais de petites aiguilles de glace, flottant dans l'atmosphère (*).

On donne le nom de *cumulus*, à ces gros nuages qui présentent la

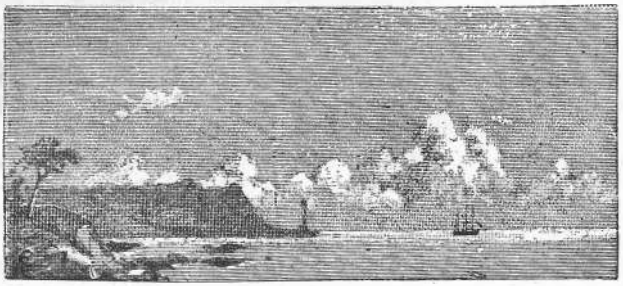


Fig. 675. — Cumulus.

forme de masses blanches, à contours arrondis (*fig.* 675), et qui couvrent souvent une partie du ciel sans amener le mauvais temps (**). —

Fig. 676. — Nimbus.

Ils sont situés à des hauteurs qui ne dépassent guère 2 à 3 kilomètres, et sont formés de gouttelettes d'eau liquide, d'une finesse extrême.

Enfin, on désigne sous le nom de *nimbus* les gros nuages sombres (*fig.* 676), qui interceptent la lumière du soleil, et qui prennent par-

(*) C'est ce que démontrent, en particulier, les phénomènes produits par le passage des rayons du soleil ou de la lune à travers ces nuages (948). — C'est ce qu'on a également pu constater dans certaines ascensions aérostatiques.

(**) Les cumulus apparaissent quelquefois, à l'horizon, sous la forme de bandes horizontales, qu'on désigne alors sous le nom de *stratus*.

fois une étendue considérable. Ils sont généralement situés beaucoup plus bas que les précédents, et peuvent arriver à raser la surface du sol.

933. Pluie. — Ni les cirrus, ni les cumulus isolés ne donnent naissance à la pluie; c'est de la rencontre de ces deux espèces de nuages, dans la verticale, que résultent ordinairement les *nimbus* ou nuages à pluie. — On comprend que, si les aiguilles de glace des cirrus, à une très basse température, viennent à rencontrer dans leur chute les gouttelettes liquides des cumulus qui s'élèvent, soulevés par les courants d'air chaud provenant du sol, il en résulte une condensation puissante, qui donne aux gouttes un poids suffisant pour les faire tomber. Leur volume s'accroît, en chemin, par la condensation de nouvelles vapeurs, en sorte que les gouttes de pluie sont d'autant plus grosses qu'elles viennent d'une plus grande hauteur.

Le mécanisme que nous venons d'exposer s'applique surtout aux pluies d'été, et notamment aux pluies d'orage. — En hiver, dans nos contrées, lorsque, à une période de froid résultant du vent de nord-est, succède un vent chaud et humide de sud-ouest, il se forme de vastes nimbus, qui déterminent des pluies abondantes. On ne peut mieux comparer le phénomène qu'à une vaste distillation, dont la chaudière serait à l'équateur, et le réfrigérant dans nos régions.

934. Neige. — Grêle. — Grésil. — Lorsque les nimbus d'hiver se forment dans des régions froides, les globules des nuages *se congèlent*, en donnant naissance à de petites aiguilles prismatiques de glace, qui se groupent généralement en étoiles régulières dont les angles sont toujours de 60°; elles affectent d'ailleurs des formes très diverses, dont la figure 677 représente quelques types. — Ce phénomène est assez

Fig. 677. — Flocons de neige.

fréquent dans les hautes régions de l'atmosphère, comme le témoignent les chutes de neige, en toute saison, sur les sommets des Alpes et des Pyrénées; mais, si la température est assez élevée au voisinage du sol, cette neige fond en chemin et arrive en pluie.

Le mécanisme de la formation de la *grêle*, en été, a embarrassé jusqu'ici presque tous les météorologistes; on peut cependant se l'expliquer en se reportant à ce que nous avons dit plus haut (933). Imaginons, d'une part, des cirrus très élevés, à 10 000 mètres, dont la température peut être, même en été, de — 20° à — 30°; d'autre part, des cumulus formés par un temps chaud et humide et s'élevant rapidement, *à une*

grande hauteur, par l'effet du courant ascensionnel d'air chaud. Ces cumulus peuvent atteindre des régions dont la température est inférieure à 0°, et y rester en *surfusion*, jusqu'à ce que les aiguilles de glace des cirrus y déterminent, par leur chute, une congélation partielle; les noyaux ainsi formés, analogues à des grains de grésil, augmenteront de grosseur par l'adjonction de couches successives d'eau en surfusion, et la congélation des couches additionnelles peut alors se produire presque instantanément. — L'observation montre en effet que, lorsqu'on coupe un grêlon en travers (*fig.* 678), on trouve généralement au centre une partie blanche et opaque, ressemblant à un grain de grésil; puis, autour de cette espèce de noyau, des couches de glace transparente.

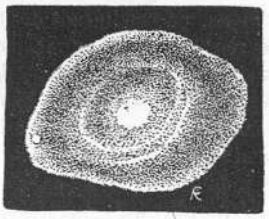


Fig. 678. — Coupe d'un grêlon.

On sait enfin que le phénomène de la grêle est intimement lié aux orages, car la chute de la grêle est toujours accompagnée d'éclairs et de tonnerre. — Volta a imaginé une théorie qui, sans rendre compte de tous les détails du phénomène, permet au moins d'en expliquer quelques-unes des particularités. Il suppose que les grêlons, se formant dans un nuage électrisé, et étant électrisés eux-mêmes, doivent être soutenus dans l'atmosphère par l'attraction de nuages placés au-dessus, chargés d'une électricité contraire et donnant lieu aux décharges électriques. Cette circonstance permettrait aux grêlons d'acquérir les dimensions considérables qu'on observe quelquefois, et dont l'explication constitue la principale difficulté de la théorie de la grêle. — A la suite d'une forte décharge électrique, le nuage laisserait échapper subitement son fardeau de grêlons, qui tomberait alors vers le sol.

La chute de la grêle est toujours de très courte durée. Les grêlons arrivent par ordre de grosseur, les plus gros les premiers, comme si tous avaient été abandonnés au même instant.

Le *grésil* paraît se former de la même manière que la grêle; seulement, l'absence de l'électricité ne permet pas à ces noyaux opaques de se soutenir dans l'air et d'y acquérir des dimensions comparables à celles des grêlons.

En résumé, on comprend comment, en hiver, la simple congélation des nimbus, dans un air froid, donne de la *neige*; comment, au printemps, la rencontre des cirrus avec les cumulus qui s'élèvent du so donne du *grésil*; comment enfin, en été, le même phénomène, accompagné d'une forte tension électrique, donne de la *grêle* (*).

(*) Les principaux traits de cette théorie de la pluie et de la grêle sont empruntés à un mémoire publié par M. E. Renou en 1868.

935. Verglas. — Une dernière circonstance peut se présenter, dans la condensation de l'eau atmosphérique : c'est une pluie (eau liquide) tombant à travers une atmosphère au-dessous de 0°, et se continuant quelques heures, en même temps que la gelée persiste au niveau du sol. Dans ce cas, assez rare d'ailleurs, il y a formation de *verglas* : la surface du sol, et de tous les objets exposés à la pluie, se couvre d'une couche *uniforme* de glace transparente et lisse, dont l'épaisseur va en augmentant avec la durée du phénomène.

Cette circonstance anormale se présente à la suite d'une longue période de froid, lorsqu'au vent du nord-est succède le retour du courant équatorial du sud-ouest. Ce courant atteint nos contrées par les hautes régions, en produisant des nuages dont la marche est contraire à celle du vent qui règne au voisinage du sol : il en résulte un trouble momentané dans la distribution de la température suivant la verticale ; le dégel commence par en haut.

Or, nous avons dit plus haut (930) que le brouillard ne se congèle dans l'atmosphère qu'à — 20° environ ; il suffit donc que les hautes régions de l'atmosphère, réchauffées par le vent du sud-ouest, arrivent à n'être plus qu'à une dizaine de degrés au-dessous de zéro, pour que la pluie puisse y prendre naissance ; cette pluie *en surfusion*, tombant sur un sol à 3 ou 4 degrés au-dessous de zéro, s'y congèle, pour la plus grande partie. Une pluie peu abondante peut même se transformer entièrement en verglas. — Le phénomène ne dure généralement que quelques heures ; le courant du sud-ouest, en s'abaissant, atteint bientôt le sol et fait remonter le thermomètre au-dessus de zéro : alors le vrai dégel commence (*). — Cette explication du verglas a été donnée par M. Nouel, en 1862.

V. — ÉLECTRICITÉ ATMOSPHÉRIQUE.

936. État électrique de l'atmosphère. — Mesure du potentiel en un point de l'air. — Ce n'est pas seulement par les temps orageux que l'atmosphère est le siège de phénomènes électriques. Lorsque, par un temps pur et sec, on place dans l'atmosphère un corps conducteur quelconque, isolé et préalablement à l'état neutre, on peut constater qu'il s'électrise positivement à sa partie inférieure, et négativement à sa partie supérieure.

Pour observer ce phénomène, on peut faire usage de l'électroscope imaginé par de Saussure (*fig.* 679). Il diffère de l'électroscope à feuilles d'or qui a été décrit (676), en ce que les feuilles d'or sont rempla-

(*) On doit cependant noter le célèbre verglas des 22, 23 et 24 janvier 1879, qui a duré trois jours sans dégel et a causé des dégâts immenses dans les forêts d'une zone s'étendant d'Épernay à Angers.

cées par de petites balles de sureau, suspendues par des fils de platine très fins : la tige est terminée par une longue pointe métallique T. — L'électroscope étant préalablement à l'état neutre, au potentiel zéro, on l'installe *en plein air*, de telle sorte que la tige s'élève à une certaine hauteur. On observe une divergence croissante des balles de sureau. On détermine la nature de leur charge : elle est généralement positive. Une égale quantité d'électricité négative s'est donc écoulée par la pointe. Ce résultat s'explique, si l'on admet que l'atmosphère constitue un champ électrique dans lequel *les lignes de force seraient verticales et dirigées de haut en bas*, puisque c'est dans ce sens que s'est déplacée l'électricité positive qui charge les balles, après que l'équilibre est établi.

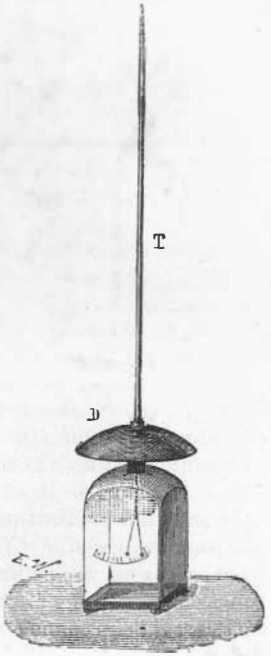


Fig. 679.
Électroscope de Saussure.

Pour mesurer le potentiel en un point de l'atmosphère, et en observer les variations, la méthode la plus précise consiste à y installer un flacon A rempli d'eau rendue conductrice, et isolé par le support S (*fig.* 680); un filet d'eau s'écoule d'une manière continue en a, et se résout en fines gouttelettes qui tombent isolément. Soit V le potentiel de l'air qui environne l'extrémité du filet liquide, au point a, et soit V′ le potentiel de la masse d'eau A; supposons $V' < V$. La différence $V - V'$ a pour effet de déterminer une force électrique F, dirigée normalement à la surface de l'eau qui s'écoule, et vers l'intérieur de l'eau (662); par suite, la densité électrique à la surface de l'eau est $\mu = -\frac{F}{4\pi}$ (654, *Rem.*). Chaque gouttelette qui s'écoule entraîne donc avec elle de l'électricité négative; il en résulte un accroissement correspondant de la charge positive du conducteur A, et par suite un accroissement de son potentiel, jusqu'à ce que l'on ait $V' = V$. Quand ce résultat est obtenu, les gouttelettes qui s'écoulent ne sont plus électrisées. — Or l'eau du flacon A est en communication permanente, par le fil f, avec un électromètre à quadrants (*fig.* 459), installé dans un laboratoire. La déviation observée sur l'instrument fait connaître la valeur du potentiel au point a. — Quant aux variations du potentiel en ce même point, on peut en obtenir une inscription graphique continue, en faisant tomber sur le miroir de l'électromètre un faisceau lumineux,

dans une direction fixe, et recevant le faisceau réfléchi sur un papier photographique qui se déplace, d'un mouvement uniforme, perpendiculairement au plan décrit par le faisceau réfléchi.

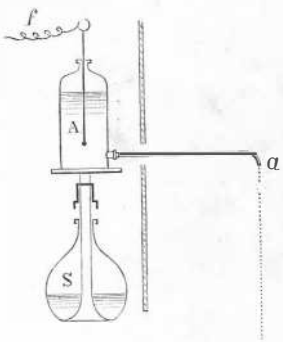


Fig. 680.

En général, lorsque le temps est serein, au-dessus d'une plaine découverte, le potentiel électrique *augmente progressivement à mesure qu'on s'élève dans l'atmosphère*. La variation de potentiel avec la hauteur est d'autant plus grande que le temps est plus pur et plus sec; elle est, en moyenne, de 300 volts par mètre. On en doit conclure que la surface du sol est le plus ordinairement couverte d'une couche d'électricité négative. — En un même point du sol, l'expérience montre que la densité électrique est variable d'un jour à l'autre; mais elle est toujours excessivement petite (*).

Quant à la cause de l'état électrique de l'atmosphère, il est difficile, dans l'état actuel de la science, de l'indiquer avec précision. — Certains auteurs admettent que la Terre a pris, au moment de sa formation une certaine quantité d'électricité négative; cette masse électrique, répartie plus ou moins irrégulièrement à la surface du sol, produirait à elle seule le champ électrique de l'atmosphère. — D'autres auteurs considèrent l'air comme étant, par lui-même, électrisé positivement; la masse électrique serait surtout répartie dans les régions élevées de l'atmosphère. C'est d'ailleurs dans ces régions qu'on observe les *aurores boréales*, particulièrement fréquentes dans les contrées polaires. Ces splendides météores, qui apparaissent sous la forme d'immenses arcs lumineux, dardant des rayons par leur partie inférieure, présentent une couleur pourprée, qui rappelle celle des décharges électriques produites dans l'air très raréfié (707). — Dans cette dernière hypothèse, la couche superficielle du sol, ordinairement négative, serait due à l'influence exercée par la masse positive de l'air.

(*) Soit v la variation du potentiel par centimètre, dans le voisinage du sol; v étant évalué en unités électrostatiques, la force électrique F, dirigée de haut en bas, serait, dans le voisinage du sol, $F = \frac{v}{1}$; par suite, d'après le théorème de Coulomb, la densité électrique de la surface du sol serait $\mu = \frac{-F}{4\pi} = -\frac{v}{4\pi}$. La tension électrostatique serait $2\pi\mu^2 = \frac{v^2}{8\pi}$. — Si l'on prend $v = 0.01$ (c'est-à-dire trois volts par centimètre, ou 300 volts par mètre), la tension électrostatique serait environ 40 millionièmes de dyne par centimètre carré.

937. Expériences anciennes, vérifiant l'identité entre les phénomènes de la foudre et ceux de l'électricité. — L'étincelle électrique qui jaillit d'une machine fortement chargée rappelle, par sa forme sinueuse, les éclairs qui apparaissent pendant les orages. Les effets mécaniques ou calorifiques, que produisent les décharges de nos batteries, rappellent aussi ceux que produit la foudre à la surface de la terre. Ce sont là des rapprochements qui furent faits dès la découverte des phénomènes électriques. — Cependant c'est à Franklin que revient la gloire d'avoir démontré qu'il y a réellement identité entre la foudre et les décharges électriques, et que la foudre est due à l'électricité dont sont chargés *les nuages*.

Les premières expériences, pour mettre en évidence l'électricité des nuages, furent faites en France par Dalibard, d'après des indications données par Franklin. — En 1752, Dalibard fit élever, dans un jardin de Marly-la-Ville, une tige de fer de 40 pieds, fixée sur un support isolant et terminée en pointe à sa partie supérieure. Il attendit que des nuages orageux vinssent à passer au-dessus de la tige. En approchant alors, de la partie inférieure, un fil de cuivre mis en communication avec le sol, il obtint une succession d'étincelles, d'une longueur remarquable. — Pour comprendre ce qui s'était produit, il suffit de se reporter à ce que nous avons vu, sur la manière dont s'électrise le conducteur d'une machine électrique (680). Admettons que le nuage fût chargé, par exemple, d'électricité positive : il agissait, sur la tige *isolée*, comme le plateau de la machine électrique agit sur le conducteur, c'est-à-dire que, sous l'influence du nuage, l'électricité négative attirée s'écoulait par la pointe; l'électricité positive était repoussée à la partie inférieure de la tige, qui pouvait ainsi fournir des étincelles à l'approche d'un corps communiquant avec le sol.

Un mois plus tard, Franklin fit lui-même, dans la plaine de Philadelphie, une autre expérience qui conduisit aux mêmes résultats. — Un cerf-volant, muni d'une pointe métallique, fut lancé dans la direction d'un nuage orageux : la corde se terminait, à sa partie inférieure, par un cordon de soie isolant. La corde de chanvre étant peu conductrice, on n'obtint d'abord que des traces douteuses d'électricité; mais, une pluie fine étant venue rendre le chanvre conducteur, Franklin put tirer de la corde des étincelles de plusieurs pouces; il put allumer de l'alcool, charger des bouteilles de Leyde, etc.

Enfin, l'année suivante, de Romas, magistrat de la petite ville de Nérac, fit encore usage d'un cerf-volant, mais il eut soin d'ajouter un fil de cuivre à la corde de chanvre, dans toute sa longueur; l'extrémité inférieure de ce fil aboutissait à un cylindre métallique, supporté par des cordons de soie. — A l'approche des nuages orageux, on présenta à ce cylindre un autre cylindre métallique, que l'on tenait par un long tube de verre, et qui était mis en communication avec le sol.

Des étincelles éclatèrent entre les deux cylindres; au plus fort de l'orage, elles prirent la forme de lames de feu, de 10 pieds de long, produisant un bruit qui s'entendait à une distance considérable. Des débris de paille, qui se trouvaient sur le sol, s'élançaient vers la corde, avec un crépitement continu. — Cette expérience se termina par un coup de tonnerre formidable : la foudre était tombée à une petite distance (*).

938. Nuages positifs et nuages négatifs. — On sait aujourd'hui que les nuages sont chargés tantôt d'électricité positive, tantôt d'électricité négative. — Il suffit, pour s'en rendre compte, d'avoir égard aux conditions diverses dans lesquelles se forment les nuages, au milieu d'une atmosphère dans laquelle le potentiel positif va progressivement en croissant à mesure qu'on s'élève (936).

En effet, un nuage, formé par la condensation de la vapeur d'eau dans l'air, peut être considéré comme une masse semi-conductrice, se substituant à la masse gazeuse non conductrice. Il doit, dès lors, s'électriser *par influence*, sous l'action du champ électrique dans lequel il se trouve. Cette action d'influence développera de l'électricité négative sur sa face supérieure, et une quantité égale d'électricité positive sur sa face inférieure : si la partie inférieure du nuage vient à se résoudre en pluie, ou si elle arrive momentanément en contact avec le flanc d'une montagne, il y aura déperdition d'électricité positive, en sorte que, une fois cette cause de déperdition supprimée, le nuage restera chargé d'une quantité prédominante d'électricité *négative*. — Si le nuage électrisé par influence, négativement à sa partie supérieure, positivement à sa partie inférieure, vient à se rompre par son milieu, il en résultera deux nuages, l'un chargé *négativement*, l'autre chargé *positivement*. — Enfin un nuage, chargé d'électricité positive ou négative, peut donner, par influence, une charge de signe contraire à tout autre nuage préalablement à l'état neutre, et qui sera momentanément en communication avec le sol.

Cette formation de nuages, tantôt *positifs*, tantôt *négatifs*, suffit pour expliquer tous les phénomènes produits pendant les orages.

939. Foudre. — On comprend que, si deux nuages chargés d'électricités contraires se rapprochent suffisamment l'un de l'autre, il éclate entre eux une décharge, résultant de la combinaison de ces deux électricités. — De même, si un nuage fortement électrisé se rapproche de la terre, il attire à la surface du sol l'électricité contraire à la sienne, et peut déterminer une décharge qui éclate entre lui et le sol.

La *foudre* n'est autre chose que la décharge puissante, qui se produit dans l'une ou l'autre de ces deux circonstances. — L'*éclair* est le

(*) On comprend tout le danger que présentent ces expériences. Le 6 août 1753, Richmann, membre de l'Académie de Saint-Pétersbourg, en renouvelant des essais du même genre, s'approcha par mégarde du conducteur électrisé : la décharge l'atteignit au front, et la mort fut instantanée.

phénomène lumineux qui accompagne la décharge. — Le *tonnerre* est le bruit de la décharge elle-même.

Nous allons étudier successivement les principales particularités que présentent ces phénomènes.

940. Éclairs. — La lueur de l'éclair, plus vive que celle des étincelles électriques artificielles, est *instantanée*. Quelle que soit la précision des méthodes employées, on n'a pu encore lui assigner aucune durée appréciable. — Quant à l'aspect du sillon lumineux, il rappelle ces étincelles en zigzags (*fig.* 494) que donnent les machines électriques fortement chargées, quand on éloigne autant que possible les surfaces entre lesquelles éclate la décharge.

La longueur de l'éclair peut parfois être très grande : les évaluations les moins exagérées portent à lui donner, dans certains cas, jusqu'à 12 ou 15 kilomètres. Pour comprendre comment l'éclair peut acquérir une pareille longueur, il faut se reporter aux conditions dans lesquelles il se produit. — L'intervalle compris entre les nuages orageux est généralement occupé par un brouillard plus ou moins épais, formé de gouttelettes d'eau flottant dans l'air. C'est dans ce milieu que se produit la décharge : on conçoit donc qu'elle puisse franchir une distance considérable, en passant d'une gouttelette à une autre, comme les décharges de nos machines franchissent la série des losanges métalliques de nos tubes étincelants (*fig.* 491). — De même, lorsque la foudre éclate entre les nuages et le sol, elle ne franchit ordinairement une aussi grande distance que grâce à la communication momentanée qui lui est offerte par la chute de l'averse orageuse.

On distingue les éclairs, au point de vue de leur éclat, en deux classes. — Les *éclairs de première classe* forment un sillon éblouissant, en général blanc ou bleuâtre, et nettement arrêté sur les bords : ils éclairent d'une lueur vive la voûte du ciel et les objets placés à la surface de la terre. — Les *éclairs de seconde classe* consistent en des lueurs diffuses, qui n'éclairent généralement qu'une partie du ciel. Ces lueurs sont produites, dans la plupart des cas, par des éclairs dont nous n'apercevons pas directement la lumière, soit qu'elle nous soit masquée par les nuages eux-mêmes, soit qu'elle se produise dans une région du ciel située au-dessous de notre horizon.

Enfin, on a désigné sous le nom de *foudre globulaire*, ou de *tonnerre en boule*, un phénomène bizarre, qui semblerait n'avoir aucune analogie avec les phénomènes électriques connus. Certains observateurs affirment avoir vu, pendant les orages, des espèces de globes lumineux se promener lentement à la surface du sol, et disparaître subitement, tantôt avec explosion, tantôt sans bruit. — Il est difficile de ne point accueillir avec quelque défiance des récits de cette nature, surtout quand ils sont faits par des personnes dont l'instruction scientifique n'est pas suffisante pour les mettre en garde contre les illusions possibles. L'expé-

rience montre en effet que, en général, une lumière vive, apparaissant au milieu de l'obscurité, peut faire éprouver à notre œil un éblouissement, se traduisant par une sorte de tache lumineuse que nous croyons apercevoir ensuite sur les divers objets où se portent nos regards : cette impression ne disparaît qu'au bout de quelques secondes. Or, il peut se faire que l'apparition d'un éclair vif produise, sur l'œil d'un observateur, une illusion de cette espèce; et alors la disparition de cette illusion pourra évidemment coïncider, soit avec l'un des instants où le tonnerre éclatera de nouveau, soit avec un moment où l'on ne percevra aucun bruit. — Quoi qu'il en soit, il paraît prudent d'attendre, avant de se prononcer sur la réalité de la foudre globulaire, que le phénomène ait pu être observé dans des conditions qui permettent de l'analyser avec certitude.

941. Tonnerre. — Le bruit du tonnerre ne nous arrive jamais que *quelque temps après la lumière de l'éclair*. — Cet effet est dû à la différence entre la vitesse de propagation de la lumière et la vitesse de propagation du son. La lumière se propage avec une vitesse de plus de 300 000 kilomètres par seconde : la lumière de l'éclair parcourt donc les quelques kilomètres qui nous séparent des nuages, en un temps tout à fait inappréciable. Le son se propage avec une vitesse qui est seulement d'environ 340 mètres par seconde : il met donc environ 3 secondes pour parcourir 1 kilomètre; dès lors, le bruit de la décharge électrique peut mettre plusieurs secondes pour nous parvenir. — Pendant un orage, si nous entendons les coups de tonnerre succéder de plus en plus rapidement aux éclairs, nous pouvons en conclure que l'orage se rapproche de nous; au contraire, si ces intervalles de temps vont en augmentant, c'est que l'orage s'éloigne.

Le roulement qui accompagne souvent les coups de tonnerre s'explique encore par des considérations du même genre. En effet, si *une même décharge* éclate à la fois entre plusieurs nuages placés à la suite les uns des autres, il se produit, dans l'atmosphère, autant de détonations, *à un même instant*. Mais nous percevons d'abord le bruit qui s'est produit dans le point le plus rapproché de nous; nous percevons ensuite, successivement, les bruits qui se sont produits en des points de plus en plus éloignés. — A cette cause s'ajoutent aussi, parfois, les échos formés par les objets qui nous entourent.

942. Effets produits par la foudre, à la surface de la terre. — Lorsque la décharge éclate entre un nuage et la terre, on dit généralement que *la foudre tombe*. Elle frappe de préférence les points qui forment des saillies à la surface du sol, parce que c'est surtout en ces points que s'accumule l'électricité attirée par l'influence des nuages. Les sommets des montagnes, les clochers, les arbres, sont les points qui sont le plus souvent atteints. Aussi, n'est-ce jamais dans leur voisinage qu'on doit chercher un abri pendant les orages.

Les effets produits par la foudre sont semblables à ceux que nous pouvons produire avec nos appareils ; ils ne s'en distinguent que par leur intensité. — Comme *effets mécaniques*, on cite des coups de foudre enlevant les toitures des bâtiments, ou arrachant les pierres ; traversant des plaques de verre, ou déchirant en filaments le tronc des arbres. — Comme *effets calorifiques*, on voit la foudre mettre le feu à des meules de paille, ou à des amas de matières combustibles ; fondre ou volatiliser des corps conducteurs, comme les fils des sonnettes ou les dorures des appartements, etc. (*).

Les commotions déterminées, chez l'homme ou les animaux, par les décharges de la foudre, peuvent occasionner les désordres les plus graves, et parfois amener instantanément la mort. — Les traces que laisse alors la décharge sont très variables : tantôt elle détermine des brûlures ou des blessures profondes ; tantôt elle ne produit aucune lésion extérieure, mais on observe une congestion au cerveau et un épanchement du sang hors des vaisseaux.

Enfin, il est des circonstances où la décharge d'un nuage peut devenir mortelle pour des animaux que la foudre n'a pas directement frappés. — Supposons qu'un nuage d'une assez grande étendue, et chargé, par exemple, d'électricité positive, décompose par influence l'électricité neutre des corps qui sont à la surface de la terre : il attire l'électricité négative à la partie supérieure de chacun de ces corps, et repousse l'électricité positive dans le sol. S'il arrive que le nuage se décharge tout à coup *sur un autre point du sol*, il s'opère, dans tous les corps influencés, une recomposition subite des électricités contraires : l'expérience a montré que la commotion produite sur les animaux, dans des circonstances de ce genre, peut être assez violente pour déterminer instantanément la mort. — C'est le phénomène qui a été désigné sous le nom de *choc en retour*.

943. Paratonnerres. — C'est encore à Franklin qu'est due l'inven-

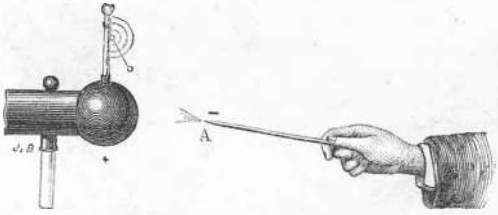


Fig. 681. — Expérience imitant l'effet produit par un paratonnerre.

tion des *paratonnerres*, qui servent à préserver nos édifices de la foudre.

Voici une expérience qui permet de comprendre le rôle d'un paraton-

(*) En traversant les couches de sable quartzeux qui forment le sol de certaines con-

nerre, pendant un orage. — Prenons à la main une tige métallique, terminée en pointe, et approchons-la d'une machine électrique en activité (*fig.* 681). Il ne jaillit *aucune étincelle* entre la machine et la tige : l'électricité négative, attirée par la machine, s'écoule immédiatement par la pointe, et se combine sans bruit avec l'électricité positive de la machine. Le corps de l'opérateur, armé de cette pointe, ne peut donc déterminer aucune décharge brusque, ni éprouver aucune commotion. — C'est ce *pouvoir des pointes* qui a conduit Franklin à l'emploi des paratonnerres.

Un paratonnerre, tel qu'on le construit le plus ordinairement aujourd'hui, se compose d'une longue tige de fer, terminée en pointe à sa partie supérieure. Pour éviter l'oxydation de la pointe, l'Académie des sciences, dans une *Instruction* publiée en 1823, avait d'abord prescrit de terminer la tige de fer par une baguette de cuivre *d*, et d'y souder une pointe de platine P (*fig.* 682). Les modifications apportées à ces

Fig. 683. Pointe de paratonnerre.

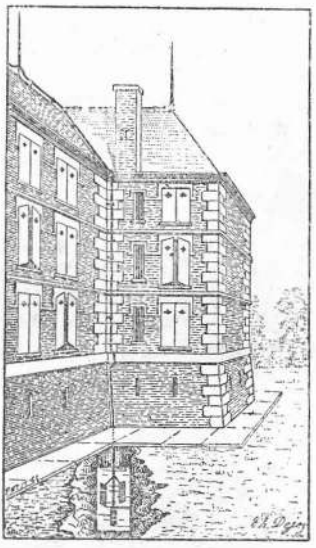


Fig. 682. — Paratonnerre.

Fig. 684. — Paratonnerres avec leurs conducteurs.

premières indications, en 1854, prescrivent simplement de terminer en pointe la tige de cuivre *mn* (*fig.* 683), et de la dorer à sa surface. — La partie inférieure du paratonnerre s'engage, par un prolongement *g*

trées, la foudre détermine la fusion du sable, et forme, avec les grains agglutinés, des espèces de tubes auxquels on donne le nom de *fulgurites*.

(*fig.* 682), dans la toiture du bâtiment; elle est mise en communication avec le sol par une tringle de fer C, réunie à la tige elle-même par un collier métallique *b*. Cette tringle de fer est le *conducteur* du paratonnerre, qui descend le long du toit et des murs de l'édifice, et vient se rendre dans le sol (*fig.* 684). Ce conducteur est mis en communication, le long de son trajet, avec toutes les pièces métalliques un peu volumineuses de l'édifice, afin que l'électricité, sollicitée dans ces pièces par l'influence des nuages, puisse se rendre dans la tige et s'écouler par la pointe. — Si l'édifice porte plusieurs paratonnerres, ils sont également mis en communication entre eux par des tiges métalliques.

Enfin, pour établir une communication aussi parfaite que possible entre l'extrémité inférieure du conducteur et le sol, on fait ordinairement plonger cette extrémité dans un puits où elle se ramifie en plusieurs branches, terminées par des plaques de tôle plongeant dans l'eau, comme le montre la figure. L'électricité repoussée par les nuages se perd ainsi rapidement par la nappe d'eau souterraine qui alimente le puits. Cette communication du conducteur avec le sol est la partie la plus importante de l'établissement du paratonnerre, et c'est aussi celle qui a été longtemps le plus mal comprise : la braise de boulanger, dont on enveloppe quelquefois les ramifications des conducteurs, est tout à fait insuffisante; il est *indispensable* que la communication ait lieu avec une vaste nappe d'eau (*). — On ne doit jamais se contenter de faire rendre l'extrémité du conducteur dans une citerne, à parois imperméables. Un paratonnerre installé dans de semblables conditions serait plutôt dangereux qu'utile.

Quand un édifice est muni de paratonnerres, dans de bonnes conditions et en nombre suffisant (**), il est rare qu'il soit frappé de la foudre : l'écoulement de l'électricité attirée vers la pointe de chaque paratonnerre se manifeste par une aigrette lumineuse, visible dans l'obscurité. — Quelquefois cependant, par un fort orage, cet écoulement ne pouvant pas se faire d'une manière assez rapide, la foudre éclate; mais elle frappe alors le paratonnerre lui-même, qui est la partie la plus saillante de l'édifice. Le plus souvent, dans ce cas, la pointe du paratonnerre est fondue : certaines parties du conducteur sont aussi parfois détériorées. On en est quitte alors pour une réparation; mais cette réparation est indispensable pour que le paratonnerre conserve dans l'avenir son efficacité.

(*) M. Nouel a conseillé, en 1874, d'établir aussi une communication entre la tige du paratonnerre et les gouttières, qui constituent, avec leurs descentes, *au moment des orages*, une excellente communication avec le sol : la pluie qui s'échappe des tuyaux, et qui va rejoindre la nappe d'eau superficielle, transforme momentanément le sol en un conducteur à surface immense.

(**) On admet généralement qu'un paratonnerre préserve de la foudre les objets compris dans un cercle dont le rayon est double de la hauteur de la tige.

944. Paratonnerres Melsens. — On doit à M. Melsens, de Bruxelles, la construction d'un système de paratonnerres assez différent de celui de Franklin : il paraît présenter le double avantage d'être moins coûteux, et d'avoir une efficacité plus certaine.

Ce système de paratonnerres est fondé sur ce principe, établi par Faraday, que si un corps quelconque est placé à l'intérieur d'une sorte de cage, formée par un réseau de fils métalliques communiquant avec le sol, ce corps ne peut éprouver, de la part des corps électrisés, placés à l'extérieur de la cage, aucune action d'influence (647 *Rem.*) (*).

On installe, sur les toits et sur tout le contour de l'édifice, des conducteurs métalliques dont la section peut être beaucoup moindre que celle des conducteurs de paratonnerres ordinaires, mais qui doivent être beaucoup plus multipliés, et reliés entre eux de manière à envelopper l'édifice d'un réseau, qui n'en altère d'ailleurs nullement l'effet architectural. Ces conducteurs sont mis en communication avec le sol, par un grand nombre de points, au moyen de puits. Aux principaux points d'intersection des conducteurs, et particulièrement sur le faîte de l'édifice, sont placées des gerbes formées par de petites tiges de cuivre, terminées en pointes, par lesquelles se produit l'écoulement de l'électricité.

VI. — VARIATIONS DU MAGNÉTISME TERRESTRE.

945. Variations de la déclinaison et de l'inclinaison, en un même lieu. — La *déclinaison*, en chaque point du globe, est soumise à des variations, dont les unes sont assujetties à une périodicité qui leur a fait donner le nom de *variations régulières*; les autres sont des *variations irrégulières*, ou *accidentelles*.

Pendant l'intervalle d'une même journée, on voit, dans nos climats, l'extrémité australe de l'aiguille de déclinaison marcher de quelques minutes vers l'ouest pendant la matinée, et jusqu'à l'heure du maximum de température; elle revient ensuite sur elle-même, à l'heure où la température s'abaisse, pour reprendre une marche semblable le jour suivant, et ainsi de suite. Ces écarts réguliers, auxquels on donne le nom de *variations diurnes*, sont cependant plus grands pendant la saison chaude que pendant l'hiver. — Dans les observations météorologiques, on peut obtenir, par la photographie, une inscription graphique continue de ces variations, en installant un miroir sur l'axe de rotation de l'aiguille, et procédant comme nous l'avons indiqué pour l'étude des variations du potentiel de l'air (956).

(*) On peut, par exemple, placer un oiseau dans une cage ordinaire, à treillage de fils de fer, en communication avec le sol, et constater que les décharges d'une machine électrique, ou même celles d'une batterie, en éclatant sur la cage, ne font éprouver à l'oiseau aucune commotion.

Si maintenant on évalue, en un lieu déterminé, la déclinaison *moyenne* de l'année, et si l'on compare entre elles les moyennes de plusieurs années successives, on constate une variation qui a reçu le nom de *variation séculaire*. Les observations faites à Paris, depuis l'année 1580, ont conduit aux résultats suivants. — En 1580, la déclinaison était orientale et égale à 11° 30′; elle a été en diminuant jusqu'en 1663, où elle est devenue nulle, puis occidentale, et l'aiguille a continué à marcher dans le même sens jusqu'en 1814. En 1814, la déclinaison occidentale a atteint un maximum, égal à 22° 35′, et elle a ensuite commencé à décroître. — En 1892, la déclinaison moyenne, toujours occidentale, était de 15° 30′7″; elle décroît actuellement d'environ 7′4″ par an : si cette loi se continue, la déclinaison à Paris deviendra nulle vers le milieu du siècle prochain; puis elle redeviendra orientale, et ainsi de suite.

Pour l'*inclinaison*, les observations remontent à une époque moins reculée. En 1671, époque postérieure à celle du maximum de déclinaison, l'inclinaison à Paris étant d'environ 75°; elle a été en décroissant depuis cette époque; sa valeur en 1892 était de 65° 9′, c'est-à-dire que, dans un intervalle de plus de deux cents ans, elle n'a diminué que d'environ 10°. — Par conséquent, tout ce qu'on peut dire jusqu'ici, c'est que les variations de l'inclinaison ont été beaucoup plus lentes que celles de la déclinaison. Mais il n'est pas impossible que ces deux éléments du magnétisme terrestre soient soumis à une période d'oscillation *de même durée*; c'est une question sur laquelle il ne sera possible de se prononcer, qu'aux époques où ces deux quantités repasseront par des maxima.

Enfin, on donne le nom de *variations accidentelles*, ou *orages magnétiques*, à de véritables perturbations, survenant brusquement dans les mouvements de l'aiguille aimantée, et ne durant en général que quelques heures. — Arago a remarqué qu'elles coïncident généralement avec l'apparition d'aurores boréales, soit en des points voisins, soit en des points éloignés. — Des observations suivies, faites dans les observatoires des colonies anglaises, qui couvrent la surface du globe, ont montré que ces orages apparaissent simultanément, avec des intensités diverses, en un grand nombre de points : la cause qui les produit ne peut donc résider que dans des phénomènes s'accomplissant à une grande distance de la surface du globe.

946. Variations de la déclinaison et de l'inclinaison magnétiques, à la surface du globe. — Puisque la déclinaison et l'inclinaison n'éprouvent, en un même lieu, pendant le cours d'une année, que des variations de quelques minutes, on comprend que l'on puisse exprimer, par des tables numériques ou par des cartes, l'état magnétique du globe *à une époque déterminée*. — Voici quelques résultats généraux, se rapportant à l'époque actuelle.

Déclinaison. — La déclinaison varie beaucoup d'un point à l'autre du globe. Elle est occidentale en Europe; elle est orientale dans la Chine et au Japon; les différences peuvent s'élever, sur un même parallèle, à un grand nombre de degrés.

On comprend quelle importance offre, pour la navigation ou pour la géodésie, la connaissance exacte de la déclinaison en chaque point du globe et à chaque instant. On trouve, dans l'*Annuaire du Bureau des longitudes*, d'une part, une table des déclinaisons et des autres éléments du magnétisme terrestre dans tous les chefs-lieux de départements de la France et dans quelques villes des pays voisins, pour le 1er janvier de l'année courante; d'autre part, une carte de France sur laquelle sont figurées les *lignes d'égale déclinaison*, ou *lignes isogones*, tracées de degré en degré, et joignant entre eux les points pour lesquels la déclinaison a présenté une même valeur, au 1er janvier.

Quant à la forme des lignes isogones, elle présente des irrégularités singulières, qu'on ne peut déterminer avec précision qu'en multipliant les observations directes, en des points de plus en plus rapprochés. — C'est ainsi que, pour la France, les recherches effectuées depuis quelques années par M. Th. Moureaux, sous la direction de M. Mascart, ont montré que la ligne isogone de 16°, au lieu de conserver sensiblement la direction nord-sud, rebrousse brusquement vers le nord-ouest, en forme de dent de scie, entre le quarante-huitième et le quarante-neuvième parallèle, jusqu'à Évreux, pour redescendre ensuite vers le sud, par Vendôme; les lignes isogones voisines affectent, autour de cette région, des formes plus ou moins semblables. — De pareilles anomalies, probablement attribuables à la constitution particulière du sol, se retrouvent sans doute dans bien d'autres régions du globe, où des recherches semblables n'ont pas encore pu être effectuées.

Inclinaison. — Les lignes *d'égale inclinaison*, ou lignes *isoclines*, donnent lieu à des remarques semblables à celles que nous venons de faire sur les lignes d'égale déclinaison.

Quant aux variations de l'inclinaison, considérées dans leur ensemble, à la surface du globe, elles peuvent se résumer comme il suit. — Supposons qu'en partant de nos latitudes, on se déplace en suivant *un méridien*; à mesure que l'on remonte vers le nord, l'inclinaison, qui était d'environ 65° à Paris, va en augmentant, le pôle austral de l'aiguille étant toujours au-dessous de l'horizon. On a même découvert, dans les régions arctiques, un point où l'aiguille se tient *verticale*, c'est-à-dire où l'inclinaison est de 90°. Ce point, situé au nord de l'Amérique et à 15 degrés du pôle, se nomme le *pôle magnétique boréal de la Terre* (*). — Si, partant de là, on redescend vers l'équateur, l'inclinai-

(*) En ce point, la déclinaison est indéterminée, puisque, les forces du couple terrestre étant verticales, elles ne peuvent donner aucune orientation à une aiguille mobile dans un plan horizontal.

son va toujours en diminuant; dans le voisinage de l'équateur, on trouve un point où l'aiguille devient *horizontale*, c'est-à-dire où l'inclinaison est nulle. Ce point appartient à l'*équateur magnétique* du globe. — Si l'on continue à marcher vers le pôle austral de la Terre, c'est le pôle boréal de l'aiguille qui s'incline au-dessous de l'horizon, et l'inclinaison va en augmentant jusqu'à 90°, en un point situé à 18 degrés environ du pôle antarctique : c'est le *pôle magnétique austral* de la Terre.

Il en est de même, au moins d'une manière générale, sur tous les méridiens. — La ligne qui réunit les points sans inclinaison s'appelle l'*équateur magnétique*; c'est une ligne assez irrégulière, mais s'écartant peu d'un grand cercle qui coupe l'équateur géographique en deux points situés à peu près aux extrémités d'un diamètre. L'équateur magnétique se déplace d'ailleurs progressivement, par les variations séculaires de l'inclinaison (*).

VII. — MÉTÉORES LUMINEUX.

947. Arc-en-ciel. — Lorsque le soleil est peu élevé au-dessus de l'horizon, et qu'en face de lui se trouve un nuage se résolvant en pluie, un spectateur, placé de manière à tourner le dos au soleil et à regarder le nuage, voit se produire un *arc-en-ciel*, c'est-à-dire un arc circulaire d'une certaine largeur, coloré des couleurs du spectre : le violet occupe le bord *interne* de cet arc; le rouge, le bord *externe*. — Quelquefois, un deuxième arc-en-ciel enveloppe le premier; les couleurs, moins brillantes, y sont disposées *dans un ordre inverse*.

Le phénomène de l'arc-en-ciel est dû à la décomposition des rayons solaires dans l'intérieur des gouttes de pluie. L'explication en a été donnée par Newton : nous en indiquerons sommairement les principes.

Lorsqu'un rayon de *lumière simple* RI (*fig.* 685 ou 686), un rayon rouge par exemple, rencontre en I la surface d'une goutte d'eau, il se divise en deux portions, dont l'une est réfléchie, et dont l'autre pénètre dans la goutte en se réfractant suivant IA; celle-ci peut subir soit une, soit deux, soit un plus grand nombre de réflexions intérieures, avant d'émerger suivant I'R'; la figure 685 représente le cas d'une seule réflexion intérieure; la figure 686, le cas de deux réflexions.

Considérons d'abord le cas d'*une seule réflexion*. — Soit un deuxième rayon *ri* (*fig.* 685), parallèle à RI et *de même réfrangibilité*, qui rencontre la surface de la sphère en un point *i* voisin de I : les angles d'incidence de ces deux rayons étant différents, il est aisé de voir qu'ils s'écartent de plus en plus l'un de l'autre, pendant leur trajet à l'intérieur de la sphère; à l'émer-

(*) L'hypothèse de l'*aimant terrestre* rend compte des diverses valeurs que présente l'inclinaison sur un même méridien. Il suffit, en effet, de disposer un aimant un peu intense dans une position fixe, et de faire parcourir à une boussole d'inclinaison une demi-circonférence, décrite sur une droite ayant la direction même de cet aimant, pour voir l'aiguille de cette boussole prendre successivement, par rapport à l'aimant, les diverses positions que nous venons d'indiquer par rapport à la ligne des pôles de la Terre. — Mais, d'autre part, les variations séculaires du magnétisme terrestre conduiraient à regarder l'aimant terrestre comme éprouvant des changements progressifs de direction, et aussi de moment magnétique.

gence, les rayons I'R' et *i'r'* suivent des directions divergentes. En d'autres termes, un faisceau de rayons simples, parallèles avant l'incidence, donne *généralement* naissance à un faisceau réfracté divergent : si donc on a égard

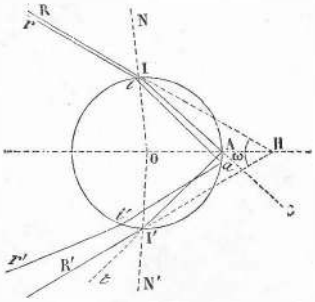


Fig. 685.

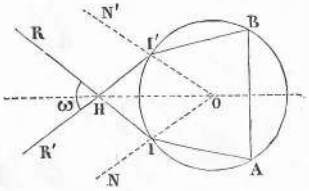


Fig. 686.

à la distance du nuage au spectateur, on conçoit que la quantité de lumière apportée à l'œil par ce faisceau soit trop faible pour y produire une impression. — Mais la *déviation totale* du rayon RI est la somme des angles III*s*,*s*AI',*t*I'R' : or, la théorie montre que, si la position de RI est telle que cette déviation totale soit *un maximum* ou *un minimum* par rapport à celles des autres rayons, les rayons voisins de RI émergeront suivant des directions sensiblement parallèles; ces rayons pourront donc impressionner l'œil : on les nomme *rayons efficaces*.

Le calcul donne, pour les rayons de *chaque couleur*, la valeur de ce maximum ou de ce minimum; et la figure montre que, en retranchant cette valeur de 4 angles droits, on obtient l'angle RHR', ou ω, que fait le faisceau incident avec le faisceau émergent; on voit aussi, en tenant compte des lois de la réflexion et de la réfraction, que les directions RI et R'I' prolongées se rencontrent en un point H de la droite OA, laquelle est bissectrice de l'angle RHR'; enfin, que l'angle d'incidence RIN est égal à l'angle d'émergence R'IN' — Dans le cas d'une seule réflexion intérieure, on trouve, pour les *rayons rouges*, $\omega = 42^{0}\,1'\,10''$, et l'angle d'incidence correspondant est de $59^{0}\,23'\,30''$.

Soit donc SAS' (*fig.* 687) une droite passant par le centre du soleil et par l'œil du spectateur, que nous supposerons placé en A; menons par ce point A, vers le nuage, une droite quelconque AM faisant avec AS' un angle de $42^{0}\,1'\,10''$: pendant la chute de la pluie, cette droite est à chaque instant rencontrée par des gouttes d'eau, de telle façon que l'angle d'incidence soit égal à $59^{0}\,23'\,30''$. Soit G une des gouttes; menons par son centre une parallèle à la bissectrice de l'angle MAS' et considérons le rayon solaire dont la direction RI est symétrique de I'A par rapport à cette parallèle. Ce rayon, en se réfractant au point I, subit une décomposition, et l'on voit, d'après ce qui précède, que le *rayon rouge* auquel il donne naissance sortira de la goutte d'eau suivant I'A, après s'être réfléchi une fois dans son intérieur; on voit, de plus, que les rayons très voisins de RI donneront, à l'émergence, un faisceau de rayons efficaces; l'œil de l'observateur placé en A recevra donc *de la lumière rouge* dans la direction I'A. — Les mêmes conclusions s'appliquant à toute droite qui fait avec AS' un angle de $42^{0}\,1'\,10''$, le spectateur verra un arc rouge, suivant l'intersection de la voûte céleste avec la surface d'un cône engendré par la révolution de I'A autour de AS'. Cet arc rouge ne sera d'ail-

leurs pas une simple *ligne* lumineuse, mais une *bande*, ayant une largeur angulaire égale au diamètre apparent du soleil : on voit en effet que l'on peut répéter, pour chacun des points du soleil, les raisonnements que nous avons faits pour le centre.

Les diverses couleurs qui composent la lumière blanche incidente donnent lieu à des phénomènes semblables ; mais la théorie montre que la valeur de

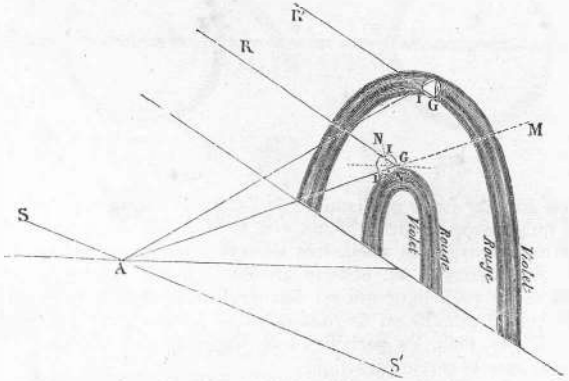


Fig. 687.

l'angle ω va progressivement en décroissant, du rouge au violet : c'est pourquoi, dans cet arc-en-ciel, le rouge occupe le bord *externe*. — Les bandes correspondantes aux sept couleurs du spectre se superposent d'ailleurs en partie ; de sorte que les couleurs de l'arc-en-ciel ne sont pas des couleurs simples, à l'exception du rouge extrême et du violet extrême.

Si l'on considère de même le cas de *deux réflexions intérieures*, on arrive à expliquer l'*arc-en-ciel extérieur*. — Dans ce cas, la valeur de l'angle ω (*fig.* 686) est plus petite pour le violet que pour le rouge : le rouge occupe donc le bord *interne*, et le violet le bord *externe*. — On comprend aussi que ce deuxième arc doive être moins brillant que le premier, parce que les rayons qui le produisent ont subi une réflexion de plus, à l'intérieur des gouttes d'eau.

948. Halos. — On nomme *halos*, des cercles colorés qui s'observent quelquefois autour du soleil, et dont cet astre occupe le centre : les couleurs y sont les mêmes que dans l'arc-en-ciel, mais le rouge est toujours *à l'intérieur*, le violet toujours *à l'extérieur*. — Le plus souvent, le halo est composé d'un cercle unique, dont le rayon est vu sous un angle d'environ 23°. Parfois, on observe un deuxième cercle, concentrique au premier, et dont le rayon est vu sous un angle double. Enfin, on peut voir apparaître un cercle ou un arc coloré, tangent au point le plus élevé du halo de 23° ; ordinairement, cet arc AA′ est à l'extérieur du cercle CC′ du halo (*fig.* 688) ; mais il se peut aussi que AA′ enveloppe le halo (fig. 689). — Les halos s'observent également autour de la lune ; mais alors les couleurs sont moins nettes.

Le phénomène des halos a été attribué par Mariotte à la décomposition de la lumière, dans les aiguilles prismatiques hexagonales de glace qui composent les cirrus (932). L'explication des halos repose sur les mêmes principes que celle de l'arc-en-ciel

949. Cercles parhéliques. — Parhélies. — Un *cercle parhélique* est une bande blanche horizontale PP′ (*fig.* 688 et 689), passant par le soleil S, et

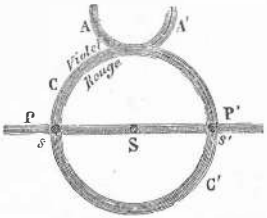


Fig. 688.

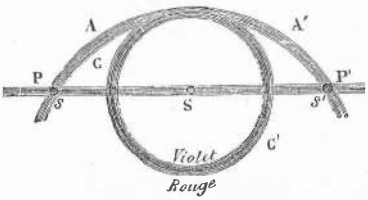


Fig. 689.

ayant une hauteur égale au diamètre de l'astre. Il accompagne ordinairement le halo, qu'il coupe en deux points *s* et *s′* (*fig.* 688); en ces points, on voit apparaître des images du soleil, très vives et colorées, qu'on nomme *parhélies*. — Ordinairement, on observe aussi une image blanche de l'astre, au point du cercle parhélique qui est diamétralement opposé au soleil; on lui donne le nom d'*anthélie* ou de *faux-soleil*. — Lorsque l'arc AA′ enveloppe le halo de 23° (*fig.* 689), les parhélies *s* et *s′* apparaissent aux intersections de cet arc AA′ avec le cercle parhélique.

Le cercle parhélique est dû à la réflexion de la lumière solaire, sur les faces des prismes de glace qui sont placées verticalement.

950. Couronnes. — Les *couronnes* sont encore des cercles colorés, qui apparaissent autour du soleil ou autour de la lune. Elles se distinguent des halos par une disposition inverse des couleurs : le rouge est toujours *à l'extérieur*, le violet *à l'intérieur*; leur diamètre est d'ailleurs bien moindre que celui des halos. — On observe fréquemment plusieurs couronnes concentriques : l'angle sous lequel on voit le rayon de la couronne intérieure varie depuis 1° 30′ jusqu'à 4°.

Le phénomène des couronnes est dû à l'action exercée sur les rayons solaires par les nuages formés de gouttelettes sphériques, sensiblement égales entre elles. — On peut le reproduire artificiellement, en saupoudrant de lycopode une lame de verre, à travers laquelle on regarde la flamme d'une bougie placée à une certaine distance.

PROBLÈMES

PROBLÈMES SUR LA PESANTEUR ET L'HYDROSTATIQUE.

I. *Dans une machine d'Atwood, chacune des masses égales pèse* 240 *grammes, la masse additionnelle pèse* 10 *grammes. On sait que, en faisant usage du système d'unités C.G.S., l'accélération de la chute libre des corps est égale à* 980 *unités d'accélération. — Evaluer,* 1° *la force* f *qui met le système en mouvement;* 2° *la masse* m *(mise en mouvement;* 3° *la hauteur de chute* h, *pour une durée de la chute égale à* 5 *secondes.*

On trouve $f = 9800$ dynes; $m = 490$ grammes; $h = 250$ centimètres.

II. *Un corps est lancé verticalement de bas en haut avec une vitesse initiale* v_0. *A quelle hauteur* h *parvient-il, et quelle vitesse* v *a-t-il en revenant au point de départ?*

On trouve $h = \frac{v_0^2}{2g}$; $v = v_0$

III. *Le fil qui s'enroule sur la poulie d'une machine d'Atwood supporte, à ses deux extrémités, deux masses égales chacune à* 240 *grammes; l'une de ces masses, ramenée à la division zéro, est surchargée d'une masse additionnelle cylindrique de* 5 *grammes, et d'une masse de forme allongée, égale aussi à* 5 *grammes. On dispose le curseur annulaire de manière à arrêter la masse de forme allongée au bout de* 2 *secondes de chute. On demande de trouver l'équation du mouvement :* 1° *quand la durée de la chute est inférieure à deux secondes;* 2° *quand la durée de la chute dépasse* 2 *secondes. — On fera usage des unités C.G.S., l'accélération de la chute libre est de* 980 *unités d'accélération.*

Solution. — La force qui sollicite le système dans la première partie de la chute est égale à $10 \times 980 = 9800$ dynes, elle n'est plus que $5 \times 980 = 4900$ dynes dans la seconde partie. — La masse entraînée est d'abord de $2 \times 240 + 10 = 490$ grammes elle n'est plus ensuite que de $2 \times 240 + 5 = 485$ grammes. — L'accélération du mouvement s'obtient, dans les deux cas, en faisant le quotient de la force par la masse : $\gamma = \frac{F}{m}$. On trouve ainsi, avant que le curseur annulaire ait arrêté la masse de forme allongée, $\gamma = 20$; après que cette masse a été arrêtée, c'est-à-dire au bout de 2 secondes, $\gamma' = 10{,}10$.

Si t est inférieur à 2 secondes, la vitesse et l'espace parcouru sont donnés par les deux équations :

$$(1) \qquad v = 20 \times t, \qquad e = 10 \times t^2.$$

En particulier, quand $t = 2$, on a $e = 40$, $v = 40$. Le curseur annulaire est donc placé à 40 centimètres du zéro, et quand le système mobile abandonne la masse de forme allongée, sa vitesse est de 40 centimètres par seconde. Cette vitesse est la vitesse initiale v_0 du second mouvement, uniformément accéléré, qui succède au premier; l'accéléra-

tion devient alors 10,10; et si l'on compte toujours l'espace parcouru à partir du zero de la règle, les deux équations du mouvement sont :

$$(2) \qquad v = 40 + 10{,}10\,(t-2), \qquad e = 40 + 40\,(t-2) + 5{,}05\,(t-2)^2.$$

IV. *Calculer la vitesse acquise par un corps pesant qui tombe d'une hauteur égale à 20 mètres, en un lieu de la Terre où la longueur du pendule qui bat la seconde est de 98 centimètres. — On négligera la résistance de l'air.*

Solution. — Soit h la hauteur de chute et v la vitesse, on a $v = \sqrt{2gh}$. — Or la longueur du pendule qui bat la seconde étant λ, la valeur de g est donnée par la formule du pendule : $1 = \pi\sqrt{\frac{\lambda}{g}}$, d'où l'on tire $g = \pi^2\lambda$. — En portant cette valeur de g dans l'expression de la vitesse, il vient :

$$v = \pi\sqrt{2\lambda h}.$$

Les unités de longueur et de temps étant le *mètre* et la *seconde*, on doit faire $\lambda = 0{,}98$, $h = 20$, et l'on trouve $v = 19{,}67$; c'est-à-dire que la vitesse est de 19 *mètres* 67 *par seconde*.

V. *Une horloge retarde de 5 minutes par jour; de combien doit-on raccourcir le pendule, pour régler cette horloge, sachant que la longueur du pendule qui bat la seconde est de 991 millimètres?*

On trouve $6^{mm},9$.

VI. *On a laissé tomber une pierre au fond d'un puits, et l'on a entendu le bruit de la chute au bout de 4 secondes et demie. Quelle est la profondeur du puits? — On supposera que le son se propage d'un mouvement uniforme, avec une vitesse de 340 mètres par seconde.*

Solution. — Soient t la durée de la chute, et x la profondeur du puits; on aura

$$(1) \qquad x = \frac{1}{2}\,gt^2.$$

D'autre part, si T est le temps écoulé entre le départ de la pierre et le moment où le bruit de la chute est parvenu à l'oreille, le temps qu'a mis le bruit de la chute, pour parvenir à l'oreille, est égal à $T - t$; en sorte que, si v est la vitesse de propagation du son, on a :

$$(2) \qquad x = v\,(T - t).$$

En éliminant t entre les équations (1) et (2), on arrive à l'équation

$$x^2 - 2\left(vT + \frac{v^2}{g}\right)x + v^2T^2 = 0,$$

d'où l'on tire,

$$x = vT + \frac{v^2}{g} \pm \sqrt{\frac{v^2}{g}\left(2vT + \frac{v^2}{g}\right)}.$$

La hauteur x du puits devant être inférieure au produit vT, qui exprimerait l'espace parcouru par le son dans le temps T, la valeur de x qui correspond au signe négatif du radical est la seule qui convienne au problème.

Si l'on prend le *mètre* et la *seconde* comme unités de *longueur* et de *temps*, on doit faire $v = 340$, $g = 9{,}8$, $T = 4{,}5$. On trouve alors $x = 88^m,2$.

VII. *Deux mobiles sont lancés successivement de bas en haut, avec la même vitesse initiale a : l'intervalle de temps qui s'écoule entre le départ du premier et le départ du second est égal à θ. — On demande : 1° à quelle hauteur et à quel instant ils se rencontreront; 2° de quelles vitesses ils seront animés à l'instant de leur rencontre.*

Solution. — Représentons par t le temps qui s'écoule entre le départ du premier mobile et l'instant de la rencontre, par e la hauteur à laquelle les deux mobiles se rencontrent, par v et v' leurs vitesses au moment de la rencontre, ces deux quantités étant

comptées positivement de bas en haut. En désignant par g l'accélération de la chute libre, et remarquant que le mouvement des deux mobiles est uniformément retardé, on aura, pour le premier mobile,

$$(1) \qquad e = at - \frac{1}{2} gt^2, \qquad v = a - gt.$$

La considération du mouvement du second mobile donne une deuxième expression de e, et la valeur de v', en remplaçant, dans les équations (1), t par $t - \theta$; on a ainsi

$$(2) \qquad e = a(t-\theta) - \frac{1}{2} g(t-\theta)^2 \qquad v' = a - g(t-\theta).$$

En égalant les deux expressions (1) et (2) de la même quantité e, on obtient une équation du premier degré, qui donne la valeur de t; en portant cette valeur dans les expressions de e, v, et v', on obtient les résultats suivants :

$$t = \frac{2a + g\theta}{2g}, \qquad e = \frac{4a^2 - g^2\theta^2}{8g}, \qquad v = -g\frac{\theta}{2}, \qquad v' = +g\frac{\theta}{2}.$$

On voit que, à l'instant de la rencontre, les deux mobiles sont animés de vitesses égales et de signes contraires : le premier mobile descend, tandis que le second s'élève. — La hauteur e doit être positive, c'est-à-dire que l'on doit avoir $\theta < \frac{2a}{g}$; en d'autres termes, le second mobile doit être lancé avant que le premier mobile soit revenu au point de départ.

VIII. *Sur un couteau ayant son arête horizontale, on dispose, perpendiculairement à cette arête, une tige pesante de poids* p *et de longueur* l, *supportant à ses extrémités des poids* P *et* Q. *Calculer les distances* x *et* y *du couteau aux extrémités de la tige, lorsque celle-ci se tient horizontalement en équilibre.*

Solution. — Pour qu'il y ait équilibre, il faut que la résultante des trois forces P, Q, et p passe par l'arête du couteau. — Or, on peut remplacer cette dernière force p, appliquée au milieu de la tige, par deux forces égales à $\frac{p}{2}$, dont les points d'application sont les deux extrémités de la tige. En exprimant que la résultante des forces $P + \frac{p}{2}$ et $Q + \frac{p}{2}$, appliquées à des distances x et y de l'arête du couteau, doit passer par cette arête, on aura une équation, qui, combinée avec la relation $x + y = l$, fera connaître les valeurs de x et de y.

IX. *Le petit piston d'une presse hydraulique a une section de* 15 *centimètres carrés; il est pressé par une force motrice de* 40 *kilogrammes. On demande :* 1° *quelle sera la force résistante* F *exercée sur le gros piston, quand il cessera de s'élever, sachant que sa section est de* 3 *décimètres carrés;* 2° *quelle section* S *devrait avoir le gros piston, pour qu'il continuât à s'élever jusqu'à ce que la force résistante fût de* 2000 *kilogrammes.*

On trouve F = 800 kilogrammes; S = 750 centimètres carrés.

X. *Une éprouvette cylindrique renferme des volumes égaux de mercure et d'eau, sur une hauteur totale de* 20 *centimètres. Cette éprouvette étant placée dans le vide, on demande d'évaluer la pression* p *à la surface de séparation des deux liquides, et la pression* P *au fond du vase. On fera d'abord usage des unités C.G.S.; puis on prendra comme unité de pression le poids du kilogramme par centimètre carré. — La densité du mercure par rapport à l'eau, est* 13,6.

On trouve, dans le système d'unités C.G.S., $p = 9800$, $P = 145\,080$. — Dans le second système d'unités, $p = 0{,}01$; $P = 0{,}146$.

XI. *Quel est le rapport des poids* x *et* y *de deux cylindres de fer et de platine qu'il faudrait fixer l'un à l'autre, pour que le système pût se maintenir en équilibre*

au milieu du mercure? — Densité du fer, 7,8; *densité du platine*, 21; *densité du mercure*, 13,6.

Solution. — Prenons comme unité de poids le poids de l'unité de volume d'eau; les poids des cylindres étant x et y, leurs volumes seront respectivement $\frac{x}{7,8}$ et $\frac{y}{21}$. Le volume du mercure déplacé sera égal à la somme de ces volumes, et le poids du mercure déplacé sera $\left(\frac{x}{7,8}+\frac{y}{21}\right)13,6$. — Ce poids devant être égal à la somme des poids des deux cylindres, on aura

$$\left(\frac{x}{7,8}+\frac{y}{21}\right)13,6 = x+y; \qquad \text{d'où} \qquad \frac{x}{y} = 0,474.$$

XII. *On a un cylindre d'acier, de 22 centimètres de longueur, qu'on voudrait lester avec un cylindre de platine de même diamètre, de manière qu'il se tint verticalement flottant dans du mercure, la partie non plongée du cylindre d'acier n'étant que de 2 centimètres : quelle longueur faut-il donner au cylindre de platine?*

Solution. — Soient d la densité du platine, d' celle de l'acier, d'' celle du mercure; x la longueur du cylindre de platine. Exprimons que le poids du corps plongé et le poids du mercure déplacé sont égaux entre eux; nous aurons

$$x\,l + 22d' = (20+x)d'';$$

d'où l'on tire la valeur de x.

XIII. *Un morceau de platine et une boule de cire se font équilibre dans les plateaux d'une balance parfaitement juste. Calculer le rapport des masses de ces deux corps en tenant compte de la poussée qu'ils éprouvent de la part de l'air. — Densité du platine*, 21; *densité de la cire*, 0,96; *densité absolue de l'air*, 0,0013.

Solution. — Faisons usage des unités C.G.S. Soit m la masse du platine; son volume est $\frac{m}{21}$, et par suite la masse de l'air qu'il déplace est $\frac{m}{21}\times 0,0013$. De même, m' étant la masse de la cire, la masse de l'air qu'elle déplace est $\frac{m'}{0,96}\times 0,0013$. Or, les poids apparents de ces deux corps dans l'air étant égaux, on a, en désignant par g l'intensité de la pesanteur,

$$\left(m-\frac{m}{21}\times 0,0013\right)g = \left(m'-\frac{m'}{0,96}\times 0,0013\right)g;$$

d'où l'on déduira facilement $\frac{m'}{m} = 0,9987$.

XIV. *Le balancier d'une horloge, fait d'une substance dont la densité est* 8,8, *bat la seconde. Quelle serait la durée t d'une oscillation, si le balancier était immergé dans l'eau?*

On trouve $t = 0^s,94$.

XV. *Un vase cylindrique, de section* S, *renferme un liquide de densité* D, *à la surface duquel on fait flotter un cylindre de bois, de section* s, *de hauteur* h *et de densité* d. *On demande : 1° la hauteur de la partie du cylindre immergée; 2° de combien le niveau s'est élevé dans le vase; 3° l'accroissement de la pression sur le fond du vase.*

Solution. — 1° Soit x la hauteur de la partie immergée; exprimons que le poids du cylindre de bois est égal au poids du liquide qu'il déplace; nous aurons, en prenant le poids de l'unité de volume d'eau comme unité de poids :

$$sx\mathrm{D} = shd, \quad \text{d'où} \quad x = h\frac{d}{\mathrm{D}}.$$

2° Le niveau du liquide s'est élevé comme si l'on avait versé dans le vase un volume de liquide $sx = sh\frac{d}{\mathrm{D}}$; l'addition de ce volume du liquide, dans un vase cylindrique de section S, produira une élévation du niveau exprimée par $y = h\frac{sd}{\mathrm{SD}}$.

3° La pression sur le fond du vase s'est accrue du poids de la colonne liquide ayant pour base le fond du vase et pour hauteur l'accroissement du niveau; l'augmentation de la pression est donc $SpD = shd$. La pression sur le fond du vase a donc augmenté du poids du cylindre qui flotte à la surface du liquide.

XVI. *Une sphère de platine et un cylindre de cuivre, ayant même diamètre, sont suspendus aux deux extrémités d'une balance parfaitement juste, et plongent, la première, dans du mercure; le second, dans l'eau. Quelle doit être la hauteur du cylindre pour que le fléau se tienne horizontal? — Poids spécifique du platine*, 22; *poids spécifique du cuivre*, 8,8; *poids spécifique du mercure*, 13,6.

Solution. — d étant le diamètre commun à la sphère et au cylindre, on doit avoir pour la hauteur du cylindre, $h = d \times 0{,}718$.

XVII. *Une sphère de liège, de rayon* r *et de densité* d, *est lestée par une sphère de plomb, de densité* D. *Quel doit être le rayon* x *de cette dernière sphère, pour que le système se tienne en équilibre quand il est complètement immergé dans l'eau?*

Application numérique : $d = 0{,}235$, $D = 11{,}35$.

On trouve $x = r\sqrt[3]{\dfrac{1-d}{D-1}} = 0{,}42 \times r$.

XVIII. *Un pèse-acides de Baumé marque* n *degrés dans un liquide. Quelle est la densité* x *de ce liquide, sachant que la densité de la solution saline qui a servi à marquer le 15e degré est* $d = 1{,}1156$. — *Application à l'acide sulfurique concentré qui marque 66 degrés.*

Solution. — Soit l'aréomètre représenté par la figure 84; appelons V le volume de l'aréomètre jusqu'au zéro, et v le volume d'une division. — Quand l'aréomètre flotte dans l'eau, il affleure au zéro; le volume de cette eau déplacée est donc V; si l'on prend comme unité de poids le poids de l'unité de volume d'eau, le nombre V exprime aussi le poids de l'eau déplacée par l'aréomètre. — Quand l'aréomètre flotte dans le liquide, jusqu'au degré n, le volume du liquide déplacé est $V - nv$, et le poids de ce liquide est $(V - nv)x$. — Enfin, quand l'aréomètre flotte dans la solution saline, le poids de cette solution qui est déplacée est $(V - 15\,v)d$.

Chacun de ces trois poids V, $(V - nv)x$, $(V - 15\,v)d$, étant égal au poids du corps flottant, il en résulte que l'on a

$$V = (V - nv)x; \qquad V = (V - 15\,v)d.$$

De la seconde équation on tire $\dfrac{v}{V} = \dfrac{d-1}{15\,d}$; en substituant dans la première, et résolvant par rapport à x, il vient :

$$x = \frac{15\,d}{15\,d - n\,(d-1)}.$$

En faisant l'application à l'acide sulfurique, on trouve :

$$\frac{v}{V} = \frac{1156}{167\,040}; \qquad x = 1{,}814.$$

XIX. *Un aréomètre de Baumé, destiné aux liquides moins denses que l'eau (fig.* 85), *est plongé dans l'alcool absolu ayant pour densité* 0,804. *A quel degré affleure-t-il, sachant que la densité de la solution qui a servi à marquer le zéro est* 1,0855?

Solution. — Ce problème se traitera comme celui qui précède. — L'aréomètre plongé dans l'alcool absolu, marque 40°,9.

XX. *Quel effort doit-on faire pour séparer les hémisphères de Magdebourg, le vide étant fait à l'intérieur?* — R *est le rayon des hémisphères,* H *la hauteur barométrique.*

Solution. — L'hémisphère inférieur étant fixé au sol, pour détacher l'hémisphère

supérieur, il faudra développer une force égale et contraire à la résultante de toutes les forces élémentaires telles que f, qui sont appliquées normalement à chacun des éléments de la surface de cet hémisphère (*fig.* 690).

Or si l'on fait usage des unités C.G.S., la pression atmosphérique, étant égale à la pression hydrostatique d'une colonne de mercure de hauteur H, est exprimée par $H \times 13{,}6 \times g$; la force f, appliquée à l'élément de surface AB a donc pour valeur

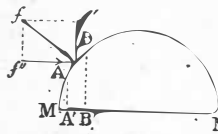


Fig. 690.

$$f = H \times 13{,}6 \times g \times \text{surf. AB}.$$

Elle peut être remplacée par deux composantes, l'une verticale f'; l'autre horizontale f''. — Par raison de symétrie, les composantes horizontales f'' se font équilibre deux à deux; tandis que les composantes verticales f', toutes parallèles entre elles, donnent une résultante égale à leur somme. Or si l'on remarque que l'angle α, que fait la force f avec sa projection verticale f', est égal à l'angle que fait l'élément de surface AB avec sa projection horizontale A'B', on a

$$\frac{f'}{f} = \frac{\text{surf. A'B'}}{\text{surf. AB}}.$$

Il en résulte que

$$f' = H \times 13{,}6 \times g \times \text{surf. A'B'}.$$

C'est-à-dire que la composante verticale de la force f, exercée sur la surface AB, est égale au poids d'une colonne de mercure qui aurait pour base la projection A'B' et pour hauteur la hauteur barométrique. La somme de toutes ces composantes f' est donc égale au poids d'une colonne de mercure de hauteur H, dont la base serait égale à la surface d'un grand cercle MN de la sphère.

XXI. *Une soupape pesant* 1 *kil. recouvre une ouverture de* 1 *décimètre carré. De quel poids* P *faut-il la charger, pour qu'elle ne s'ouvre que sous une différence de pression de* 10 *atmosphères?*

On trouve P = 1052 kilogrammes. — Une pression d'une atmosphère équivaut au poids de 1^{kg},033 par centimètre carré (118).

XXII. *Un ballon contenant de l'air à la pression de* 770 *millimètres de mercure est ajusté, au moyen d'une monture à robinet, à la partie supérieure d'un baromètre à cuvette, dont le tube a une section de* 2 *centimètres carrés et une longueur de* 90 *centimètres au-dessus du niveau du mercure dans la cuvette. La pression extérieure étant de* 760 *millimètres, on ouvre le robinet; le mercure s'abaisse dans le tube, de telle sorte que sa surface ne se trouve plus qu'à* 10 *centimètres au-dessus du niveau dans la cuvette. On demande d'en déduire la capacité du récipient, en supposant que la température soit restée invariable pendant l'expérience.*

Solution. — Soit x le volume du récipient, exprimé en centimètres cubes. Avant l'ouverture du robinet, le volume d'air contenu dans l'appareil est x; sa pression, évaluée en hauteur de mercure, est 770 millimètres; quand le robinet est ouvert, le volume de cet air devient $x + 2(90 - 10)$, ou $x + 160$, et sa pression est $760 - 100$ millimètres, ou 660 millimètres. D'après la loi de Mariotte, le produit de chacun de ces volumes par la pression correspondante étant constant (158), on a :

$$x \times 770 = (x + 160)660;$$

d'où l'on tirera $x = 960^{cc}$.

XXIII. *On a construit un baromètre à cuvette sans se préoccuper d'en chasser complètement l'air, de sorte que la chambre barométrique contient une quantité inconnue de ce gaz. On fait une première observation, dans laquelle on mesure successivement la hauteur de la colonne de mercure, qui est* 748 *millimètres, et la longueur de la chambre barométrique, qui est* 122 *millimètres. On soulève alors un peu le tube et l'on constate que la hauteur du liquide devient* 750 *millimètres, la chambre barométrique acquérant une longueur de* 141 *millimètres. Quelle est la pression atmosphérique* H

au moment de l'expérience, en supposant que le tube soit bien cylindrique, au moins dans sa partie supérieure? (*).

On trouve $H = 762^{mm},8$.

XXIV. *Un eudiomètre à mercure, de section uniforme dans toute sa longueur, est placé sur la cuve à mercure; il contient du gaz ammoniac, sur une longueur de 10 centimètres; le mercure s'élève dans le tube à 25 centimètres au-dessus de sa surface libre dans la cuvette. On fait passer dans l'eudiomètre une série d'étincelles électriques (fig. 497), jusqu'à ce que le gaz soit complètement décomposé; trouver la longueur occupée par le gaz. — Le baromètre marque 76 centimètres.*

Solution. — Soit s la section du tube; le volume du gaz ammoniac est égal à $10 \times s$, sous la pression $76 - 25 = 51$; si le gaz était sous la pression atmosphérique, son volume serait donc $s\,\frac{10 \times 51}{76}$. — Après le passage des étincelles, le volume du mélange d'azote et d'hydrogène est $x \times s$, en désignant par x la longueur cherchée, exprimée en centimètres; la longueur de la partie de l'eudiomètre, qui est en dehors de la cuve à mercure, est $10 + 25 = 35$ centimètres; la hauteur occupée par le mercure est donc $35 - x$, et par suite la pression du mélange gazeux est $76 - (35 - x) = 41 + x$. Si le gaz était sous la pression 76, il occuperait le volume $s\,\frac{x(41 + x)}{76}$. — Or, on sait que le volume du mélange d'azote et d'hydrogène est le double du volume primitif du gaz ammoniac, ces deux volumes étant mesurés sous la même pression; on a donc

$$2 \times s\,\frac{10 \times 51}{76} = s\,\frac{x(41 + x)}{76},$$

ou

$$x^2 + 41\,x - 1020 = 0.$$

On doit rejeter la racine négative; en faisant le calcul, on trouve $x = 17^{cm},2$.

XXV. *Un tube vertical, de longueur* l *et de section* b, *est rempli de mercure l'extrémité supérieure est bouchée, l'autre extrémité est effilée, et communique avec un cylindre de longueur* L *et de section* B, *rempli d'air sec sous la pression atmosphérique. On débouche le tube, et l'on demande quelle sera la hauteur* x *du mercure dans le tube, quand l'écoulement s'arrêtera. — La hauteur barométrique est* H.

Solution. — Puisque le tube fermé à sa partie supérieure est rempli de mercure, sa longueur l doit être inférieure à la hauteur barométrique H.

La longueur x est déterminée par l'équation

$$(BL - bl + bx)(H + x) = BLH.$$

La racine positive convient seule.

XXVI. *Un gros tube cylindrique vertical* M, *ouvert à sa partie supérieure, et un petit tube cylindrique vertical* m, *fermé à sa partie supérieure, communiquent entre eux, par leurs parties inférieures, au moyen d'un tube de jonction; le premier,* M, *a une section de 50 centimètres carrés; le second,* m, *a une section quelconque. On a versé du mercure dans l'appareil, et l'on a enfermé ainsi dans le tube* m *un certain volume d'air, qui y occupe une longueur de* $2^m,15$, *les niveaux du liquide dans les deux branches étant dans le même plan horizontal. Quelle force* F, *évaluée en kilogrammes, devrait-on appliquer sur la surface du liquide du tube* M, *à l'aide d'un piston qui s'adapterait exactement dans ce tube, pour que l'air n'occupât plus, dans le tube* m, *qu'une longueur de* $0^m,32$? — *Le tube* m *est supposé assez étroit, par rapport à* M, *pour que le niveau du mercure n'ait pas sensiblement baissé dans* M; *la température reste invariable pendant l'expérience, et la pression barométrique est de 760 millimètres.*

On trouve $F = 324^{kg},5$.

(*) Cette méthode est applicable à la construction de baromètres dont on pourrait enlever le liquide, en voyage, pour éviter les chances de rupture, et qu'on remplirait seulement au moment l'observation, sans se préoccuper d'en expulser complètement l'air. (ARAGO, *Astronomie populaire.*)

XXVII. *Une cloche cylindrique, en cristal, de poids* p, *de section intérieure* s, *de hauteur intérieure* h + l, *est renversée sur le mercure, qui s'y élève à la hauteur* h; *le reste de la cloche contient de l'air, sur la longueur* l. *La hauteur barométrique est de 76 centimètres, et la température est* 0°.

Quel est l'effort à faire pour soutenir la cloche? — Que devient cet effort, si l'on fait passer dans la cloche un morceau de fer de volume v, *le niveau du mercure à l'extérieur restant invariable?*

a, m, c, f, *sont les poids spécifiques de l'air, du mercure, du cristal et du fer.*

Application numérique : p = 450 *grammes*, s = 40 *centimètres carrés*; h = l = 10 *centimètres*; v = 200 *centimètres cubes*; a = 0,0015; m = 13,6; c = 3; f = 7,48.

Solution. — Prenons comme unité de force le poids du gramme, et comme unité de volume le centimètre cube.

En supposant que le mercure contenu dans la cloche soit solidifié jusqu'au plan horizontal de la surface libre du mercure extérieur, on ne modifie pas les conditions d'équilibre; l'effort F qu'il faut développer pour soutenir la cloche, est donc égal au poids apparent de la cloche et de son contenu. On a donc :

$$F = p + shm + sla\,\frac{76-h}{76} - \left(\frac{p}{c} + s(h+l)\right)a;$$

ou, après simplification :

$$F = p + shm - \left(\frac{p}{c} + sh + s\,\frac{hl}{76}\right)a = 5889^{gr},22.$$

Quand le morceau de fer a été introduit dans la cloche, il a fait sortir une certaine quantité de mercure, en sorte que la hauteur du mercure dans la cloche au dessus de la surface extérieure est devenue y. Le fer flotte à la surface du mercure, x étant le volume immergé, défini par la relation $x.m = v.f$; en sorte que le volume du fer qui émerge est $v - x$, ou $v\,\frac{m-f}{m}$.

Pour calculer y, on a recours à la loi de Mariotte. La même masse d'air, qui occupait d'abord le volume sl, sous la pression $76 - h$, occupe ensuite le volume

$$s(l + h - y) - v\,\frac{m-f}{m},$$

sous la pression $76 - y$: y est donc déterminé par la racine positive de l'équation du second degré :

$$\left[s(l+h-y) - v\,\frac{(m-f)}{m}\right][11 - y] = sl\,(76 - h)$$

on trouve

$$y = 8^{cm},0586.$$

En raisonnant comme ci-dessus, on calculerait l'effort F' :

$$F' = p + (sy - x)m + vf + sla\,\frac{76-h}{76} - \left[\frac{p}{c} + s(l+h)\right]a.$$

Après simplification,

$$F' = p + sym - \left[\frac{p}{c} + sh + s\,\frac{lh}{76}\right]a = 4822^{gr},22.$$

XXVIII. *Dans un récipient rempli d'air sec sous la pression de* 750 *millimètres, on fait le vide jusqu'à une pression* x, *et l'on fait entrer de l'hydrogène dans le récipient, jusqu'à ce que le mélange soit sous la pression de* 750 *millimètres. On fait encore une fois le vide, sous la pression* x, *et l'on fait de nouveau entrer de l'hydrogène jusqu'à ce que la pression du mélange soit de* 750 *millimètres. Trouver quelle doit être la valeur de* x, *pour que le poids de l'hydrogène soit la dixième partie du poids de l'air avec lequel il est mélangé. — La densité de l'hydrogène est* 0,069.

On trouve $x = 479$ millimètres.

XXIX. *Dans une éprouvette graduée, placée sur la cuve à mercure, et contenant un volume* v *d'eau, sans air, on introduit un volume* V *d'un mélange d'acide carbonique*

et d'oxyde de carbone, sous la pression H. — *Après un certain temps, le volume occupé par le gaz est devenu* V_1, *sous la pression* H_1. *De ces données, et des coefficients de solubilité c' et c'' des deux gaz, déduire la composition du mélange.*

Solution. — Soient x' et x'' les pressions de l'acide carbonique et de l'oxyde de carbone dans le mélange occupant le volume V avant la dissolution. On a :

$$x' + x'' = H. \qquad (1)$$

Après la dissolution d'une partie de chacun des gaz, la force élastique de l'acide carbonique au-dessus de l'eau est f', celle de l'oxyde de carbone est f''; et l'on a

$$f' + f'' = H_1. \qquad (2)$$

Avant la dissolution, l'acide carbonique occupait un volume V, sous la pression x' : après la dissolution, une partie de ce gaz occupe le volume V_1 sous la pression f', et l'autre partie peut être considérée comme occupant le volume $c'v$ sous la même pression f'; on a donc

$$(V_1 + c'v) f' = Vx'. \qquad (3)$$

On aurait de même, en considérant l'oxyde de carbone,

$$(V_1 + c''v) f'' = Vx''. \qquad (4)$$

Des équations (3) et (4) on tire les valeurs de f' et de f''; en les portant dans l'équation (2), on a une équation en x' et x'', qui, combinée avec l'équation (1), donne les valeurs de x' et de x'' :

$$x' = \frac{(V_1 + c'v)(VH - V_1H_1 - c''vH_1)}{V v (c' - c'')}; \qquad x'' = \frac{(V_1 + c''v)(VH - V_1H_1 - c'vH_1)}{V v (c'' - c')}$$

XXX. *Un corps de pompe, auquel on veut donner une hauteur de* 90 *centimètres, est terminé inférieurement par un tuyau d'aspiration, dont le diamètre intérieur est* 35 *millimètres, et dont la hauteur est* $4^m,80$ *au-dessus du niveau de l'eau dans laquelle il plonge; quel diamètre* D *devra-t-on donner à ce corps de pompe, pour que l'eau s'élève, au premier coup de piston, jusqu'au sommet du tuyau d'aspiration? — On supposera la pression atmosphérique égale à celle de* 10 *mètres d'eau.*

On trouve $D = 11^{cm},2$.

XXXI. *Une fontaine de compression (fig.* 157), *de forme cylindrique, ayant une base de* 5 *décimètres carrés et une hauteur de* 50 *centimètres, contient de l'eau jusqu'à la moitié de sa hauteur; on y adapte, pour y comprimer de l'air, une pompe à main dont le corps de pompe a une section de* 12 *centimètres carrés et une hauteur de* 40 *centimètres. On donne* 20 *coups de piston; trouver : 1° à quelle hauteur* H *l'eau s'élèverait dans un tube étroit, ouvert à sa partie supérieure, qu'on substituerait à la pompe; 2° quelle force* F, *évaluée en kilogrammes, on devrait exercer sur une soupape placée à la partie supérieure du cylindre et ayant une surface de* 15 *centimètres carrés, pour la maintenir fermée.*

On trouve $H = 7^m,958$; $F = 11^{kgr},907$.

XXXII. *Sous le récipient d'une machine pneumatique contenant de l'air sec à* 0^0 *et à la pression de* 760 *millimètres, on place un fléau de balance dont les bras sont égaux, et aux deux extrémités duquel sont suspendus deux cubes : l'un a* 3 *centimètres de côté et pèse dans l'air* $26^{gr},3240$, *et l'autre, qui a* 3 *centimètres de côté, pèse dans l'air* $26^{gr},2597$; *par suite de cette inégalité de poids, le fléau n'est pas horizontal. On raréfie l'air dans l'appareil et l'on demande quelle sera la pression sous le récipient, quand l'horizontalité sera établie. — La température sera supposée égale à* 0^0 *pendant toute l'expérience.*

Solution. — Soit x la pression cherchée, évaluée en millimètres de mercure; prenons pour unité de poids le poids du gramme. Pour obtenir le poids apparent du premier cube, au moment où l'horizontalité sera établie, il suffira de déterminer d'abord son poids dans le vide, et d'en retrancher le poids de l'air qu'il déplace sous le

récipient : or, le poids spécifique de l'air par rapport à l'eau, à 0° et sous la pression de 760 millimètres, est 0,0015; le poids du premier cube dans le vide est donc $26^{gr},5240 + 5^3 \times 0,0015$; le poids de l'air qu'il déplace sous le récipient à la fin de l'expérience est $5^3 \times \frac{0,0015 \times x}{760}$: son poids apparent sous le récipient est donc définitivement

$$26^{gr},5240 + 5^3 \times 0,0015 \left(1 - \frac{x}{760}\right).$$

De même, le poids apparent du second cube, sous le récipient, est

$$26^{gr},2597 + 5^3 \times 0,0015 \left(1 - \frac{x}{760}\right).$$

En égalant entre elles ces deux expressions, on trouve $x = 576^{mm}$.

XXXIII. *Un aérostat sphérique, de 10 mètres de diamètre, est construit avec du taffetas pesant 250 grammes par mètre carré. Quel volume d'hydrogène doit-on introduire dans l'enveloppe, pour lui donner une force ascensionnelle de 10 kilogrammes? — La densité de l'hydrogène est 0,0692; on négligera la poussée subie par l'enveloppe. — La température est 0°, et le baromètre marque 76 cent.*

On trouve $V = 65^{mc},2$.

XXXIV. *Après avoir fermé la branche inférieure d'un baromètre à siphon, et y avoir ainsi enfermé une certaine quantité d'air sec, on observe la position du niveau du mercure dans la branche inférieure, à la température 0°, en un lieu de la Terre où l'intensité de la pesanteur est connue et égale à g. On connaît le volume V occupé par l'air sec, la section s de chacune des deux branches, et la distance verticale H des deux niveaux du mercure dans les deux branches. — On transporte l'instrument dans une deuxième station, et l'on observe que, la température étant encore 0°, le niveau du mercure dans la branche qui renferme l'air s'est abaissé de a. Comment pourra-t-on en déduire l'intensité g' de la pesanteur, à cette deuxième station?*

Solution. — Lors de la première observation, le volume occupé par l'air est V, sous la pression exercée par une colonne de mercure de hauteur H, pression exprimée par Hdg; en désignant par d la densité de mercure (*note de la page 90*). — L'instrument étant transporté à la deuxième station, le volume de l'air est devenu $V + sa$, la hauteur de la colonne mercurielle est devenue $H + 2a$, et la pression qu'elle exerce est égale à $(H + 2a)dg'$.

En appliquant la loi de Mariotte, il vient :

$$(V + sa)(H + 2a)\,g' = VHg$$

d'où l'on tire la valeur de g'.

PROBLÈMES SUR LA CHALEUR

XXXV. *Un thermomètre est plongé, jusqu'au 20e degré de son échelle, dans un liquide chaud; le mercure s'élève dans la tige jusqu'au 150e degré. Cette indication ne donnant pas la température exacte du liquide, puisque la portion de la colonne mercurielle comprise entre les divisions 20 et 150 n'est pas plongée dans le bain, on demande de calculer la correction qu'elle devra subir, en supposant que la température de la portion extérieure de la colonne mercurielle soit égale à celle de l'atmosphère environnante, savoir 15°; on prendra pour coefficient de dilatation apparente du mercure dans le verre le nombre* $\frac{1}{6480}$.

Solution. — Désignons par x la température réelle du bain, c'est-à-dire celle que marquerait le thermomètre si toute la tige était plongée; le nombre x est évidem-

ment la somme de 130 degrés, plus la dilatation *apparente* qu'éprouvent 130 — 20 ou 110 divisions de mercure, lorsque leur température s'élève de 15 degrés à x degrés. Donc

$$x = 130 + 110\,(x - 15)\,\frac{1}{6480}\,; \qquad \text{d'où} \qquad x = 131°,99.$$

XXXVI. *Quel est le rapport des poids* x *et* y *de mercure et de platine qu'il faut introduire, à la température de zéro degré, dans un vase de fer, pour que, dans ce vase, la dilatation apparente soit nulle, de zéro à une température quelconque* t, *cette dernière température étant inférieure à 100 degrés? — Densité du mercure*, 13,6. *Densité du platine*, 21. *Coefficient de dilatation absolu du mercure, entre zéro et 100 degrés*, 0,0001815. *Coefficient de dilatation cubique du platine*, 0,0000257. *Coefficient de dilatation cubique du fer*, 0,0000566.

On trouve $\dfrac{x}{y} = 0{,}0487.$

XXXVII. *Après avoir divisé un tube en parties d'égales capacités, on y introduit une longue colonne de mercure; puis on la fait sortir et on la pèse : elle occupait 250 division et pèse* 2^{gr},5. *On souffle ensuite un réservoir à ce tube et l'on en fait un thermomètre à mercure. Le poids de mercure introduit est* 129^{gr},6. *On détermine les points fixes de ce thermomètre, et l'on trouve qu'il marque 10 divisions à 0°, et 210 divisions à 100°. On demande, d'après cela, quel est le coefficient* $\dfrac{1}{n}$ *de dilatation cubique du mercure; on exprimera* n *avec trois chiffres significatifs seulement.*

Le coefficient de dilatation absolu du mercure est $m = \dfrac{1}{5550}$.

Solution. — On déduit des données le coefficient de dilatation apparente $\mu = \dfrac{1}{6480}$; par suite, $\dfrac{1}{n} = m - \mu = \dfrac{1}{38700}$.

XXXVIII (suite). *Après avoir enlevé le mercure, on met de l'eau à sa place. Ce thermomètre à eau marque 20 divisions à 0°; 26,5 à + 15°; 13,5 à — 15°. On demande quel est le volume de l'eau à + 15° et à — 15°, celui de l'eau à zéro étant pris pour unité.*

On trouve : à + 15°, $\dfrac{12976{,}5}{12970}\left(1 + \dfrac{15}{38700}\right) = 1{,}00088.$

à — 15°, $\dfrac{13023{,}5}{12970}\left(1 - \dfrac{15}{38700}\right) = 1{,}0037.$

XXXIX. *Un tube bien calibré est divisé en parties d'égales longueurs et soudé à un réservoir. On y introduit une première fois* 137^{gr},5 *de mercure : dans la glace fondante, le mercure s'arrête à la 175^{e} division du tube; dans l'étuve à vapeur d'eau bouillante sous la pression normale, le mercure s'arrête à la 510^{e} division. — On y introduit une nouvelle quantité de mercure, en tout* 139^{gr},6 : *dans la glace fondante, le mercure s'arrête à la 346^{e} division.*

On vide l'appareil et on le remplit d'un liquide qui affleure à la 180^{e} division dans la glace fondante, à la 526^{e} division dans un bain à 20°.

On demande : 1° la dilatation apparente du mercure entre 0° et 100°, et le coefficient moyen de dilatation; 2° la dilatation de l'enveloppe entre 0° et 100°, et le coefficient moyen de dilatation; 3° la dilatation du liquide entre 0° et 20°, et le coefficient moyen de dilatation.

On trouve :

1° 0,0121 ; 0,000 121
2° 0,0059 ; 0,000 059
3° 0,0190 ; 0,000 950

XL. *On a un thermomètre centigrade à mercure, dont la tige est divisée en degrés. Le coefficient de dilatation apparente est* $\dfrac{1}{6480}$. *On y remplace le mercure par de*

l'eau. Le thermomètre à eau, ainsi formé, marque 20 *degrés dans la glace fondante et* 85 *degrés quand on le plonge dans un bain à* 45°. *On demande quelle est la dilatation de l'eau de* 0° *à* 45°.

On trouve 0,01117.

XLI. *Un thermomètre à poids contient* 3 *kilogrammes de mercure à* 0°. *On le chauffe; il sort* 50 *grammes de mercure. A quelle température* t *l'a-t-on chauffé? Coefficient de dilatation cubique du verre* $\frac{1}{58700}$; *coefficient de dilatation absolu du mercure* $\frac{1}{5550}$.

On trouve $t = 110°$.

XLII. *Une sphère de platine, pesée dans le mercure, a perdu de son poids* 50 *grammes à zéro, et* 49^{gr},5415 *à* 60°. *On demande de trouver, d'après ces données, le coefficient de dilatation cubique du platine, sachant que la densité du mercure à zéro est* 13,6 *et que le coefficient de dilatation absolue de ce liquide est* $\frac{1}{5550}$.

Solution. — Désignons par V le volume de la sphère de platine à zéro, et par x le coefficient de dilatation cubique du métal; le poids du mercure à zéro que cette sphère déplace étant 50 grammes, on a

$$V \times 13,6 = 50.$$

A 60°, le volume de la sphère est devenu $V(1 + 60x)$; d'autre part, la densité du mercure est devenue

$$\frac{13,6}{1 + 60 \times \frac{1}{5550}}, \qquad \text{ou} \qquad \frac{13,6 \times 185}{187};$$

et comme la perte de poids est maintenant de 49^{gr},5415, il vient

$$V(1 + 60x)\frac{13,6 \times 185}{187} = 49,5415.$$

En remplaçant, dans cette équation, $V \times 13.6$ par 50, et tirant la valeur de x, on aura

$$x = \frac{49,5415 \times 187 - 50 \times 185}{50 \times 185 \times 60} = \frac{14,2605}{555000} = 0,00002569.$$

XLIII. *Trouver quel rapport on doit établir entre la hauteur du mercure et la longueur de la tige, dans le pendule de Graham (fig.* 179), *pour que la compensation ait lieu. — On considérera le poids de la tige et celui du cylindre de verre comme négligeables par rapport au poids du mercure.*

Solution. — Représentons par L_0 la longueur à zéro de la tige du pendule, augmentée de la hauteur de l'étrier, et par h_0 la hauteur du mercure à zéro qu'il faut introduire dans l'éprouvette, pour que la distance du point de suspension au centre de gravité du liquide soit la même à zéro et à une température déterminée t. L'expression de cette distance, ou la *longueur* du pendule à zéro, est évidemment $L_0 - \frac{h_0}{2}$, en négligeant l'épaisseur du fond de l'éprouvette.

Soient l le coefficient de dilatation linéaire de l'acier, y la hauteur encore inconnue du mercure dans l'éprouvette, à la température de t degrés. La longueur du pendule à cette température sera $L_0(1 + lt) - \frac{y}{2}$, pour qu'elle soit égale à la longueur à zéro, il faut et il suffit que l'on ait

$$L_0 - \frac{h_0}{2} = L_0(1 + lt) - \frac{y}{2}. \tag{1}$$

Nous allons chercher à exprimer y en fonction de h_0 et des coefficients de dilatation du verre et du mercure. Soit r le rayon de la section intérieure de l'éprouvette à zéro;

$\pi r^2 h_0$ est le volume du mercure à cette température; il devient $\pi r^2 h_0 (1 + mt)$ à t degrés, m étant le coefficient de dilatation absolue du mercure. — Soit δ le coefficient de dilatation linéaire du verre; en passant de zéro à t degrés, le rayon r devient $r(1 + \delta t)$, et la section πr^2 devient $\pi r^2(1 + \delta t)^2$ ou sensiblement $\pi r^2 (1 + 2\delta t)$. Mais, à cette température, la hauteur du mercure est y; le volume du liquide est donc $\pi r^2 (1 + 2\delta t) y$. — En égalant les deux expressions du volume du mercure à t degrés, on obtient une équation qui détermine y,

$$\pi r^2 h_0 (1 + mt) = \pi r^2 (1 + 2\delta t) y;$$

en substituant la valeur de y dans l'équation (1), on a :

$$L_0 - \frac{h_0}{L_0} = L_0 (1 + lt) - \frac{h_0}{2} \frac{1 + mt}{1 + 2\delta t}.$$

Si l'on fait toutes les réductions, et si l'on néglige tous les termes qui renferment le produit des deux coefficients de dilatation, on arrive à la relation bien plus simple

$$\frac{h_0}{L_0} = \frac{2l}{m - 2\delta}.$$

Ce résultat est indépendant de la température particulière t, pour laquelle nous avons mis le problème en équation. Donc la compensation aura lieu *pour toute température*, pourvu que, à zéro, le rapport entre la hauteur du mercure et la longueur de la tige, augmentée de celle de l'étrier, soit égal à la fraction $\frac{2l}{m - 2\delta}$, fraction dont la valeur est environ $\frac{1}{6}$.

XLIV. *Un récipient, de volume invariable, renferme à la température de* 0°, *10 kilogrammes de gaz comprimé. — On fait sortir du récipient 3 kilogrammes de gaz, et l'on chauffe pour rétablir dans l'appareil la même pression qu'au début. A quelle température faut-il chauffer? — Le coefficient de dilatation du gaz est* $\alpha = \frac{1}{273}$.

On trouve $\frac{3}{7} \times 273 = 117°$.

XLV. *Quel doit être le rayon d'un ballon sphérique, formé d'un taffetas qui pèse* 250 *grammes le mètre carré, pour que, plein d'hydrogène sec à* 20 *degrés et à la pression de* 750 *millimètres, il ait une force ascensionnelle nulle, lorsqu'il se trouve dans l'air sec à la même température et à la même pression? — Poids du litre d'air sec à zéro et sous la pression de* 760 *millimètres,* 1^{gr},295; *densité de l'hydrogène par rapport à l'air*, 0,0693.

Solution. — Désignons par r le rayon du ballon, exprimé en mètres : la surface de l'enveloppe étant $4\pi r^2$, le poids de l'enveloppe en grammes sera $250 \times 4\pi r^2$. Le poids de l'hydrogène, en grammes, dans les conditions données par l'énoncé, sera, en remarquant que, dans les circonstances normales, un mètre cube d'air pèse 1293 grammes,

$$\frac{4}{3} \pi r^3 \times 1293 \times 0{,}0695 \times \frac{750}{760} \times \frac{1}{1 + 0{,}00367 \times 20}.$$

Enfin le poids de l'air déplacé sera, en grammes,

$$\frac{4}{3} \pi r^3 \times 1293 \times \frac{750}{760} \times \frac{1}{1 + 0{,}00367 \times 20}.$$

Si maintenant on exprime que la somme des poids de l'enveloppe et de l'hydrogène, diminuée du poids de l'air déplacé, est nulle, on obtient une équation, d'où l'on tirera $x = 0^m{,}678$.

XLVI. *On a, dans deux éprouvettes, d'une part,* 4 *centimètres cubes d'un gaz à* 7 *degrés sous la pression de* 56 *centimètres de mercure; d'autre part,* 6 *centimètres*

cubes d'un autre gaz à 17 degrés sous la pression de 38 centimètres. On introduit ces deux gaz dans une troisième éprouvette, où le mélange prend une température de 15 degrés. On demande à quelle hauteur x le mercure s'élèvera dans cette éprouvette, dont la section est de 1 centimètre carré, et dont la hauteur au-dessus du mercure est de 21 centimètres. — Le baromètre marque 76 centimètres; le coefficient de dilatation des gaz est $\frac{1}{273}$. *— On négligera les dilatations du mercure et du verre.*

Solution. — La hauteur x est exprimée par la plus petite des deux racines de l'équation

$$(21 - x)(76 - x) - 576 = 0.$$

La plus grande des deux racines, étant supérieure à 76, n'est pas acceptable. — On trouve $x = 12$ centimètres.

XLVII. *Après avoir laissé échapper une partie de l'air sec qui était comprimé dans un récipient, on ferme le robinet et l'on observe, au même instant, la hauteur* h *d'un manomètre à air libre qui communique avec le récipient. Lorsque l'air qui reste dans le récipient est revenu à la température ambiante* T, *on note la hauteur* H *du manomètre. Quelle était la température* t *de l'air intérieur au moment où il a été refroidi par sa raréfaction? La hauteur du baromètre est 76 cent. — On négligera la section du tube manométrique.*

La température t est déterminée par l'équation $\frac{76 + h}{273 + t} = \frac{76 + H}{273 + T}$.

XLVIII. *Dans une cloche graduée en centimètres cubes, à 0 degré, pleine de mercure, et placée sur une cuvette à mercure, on a introduit* $0^{gr},75$ *d'éther : la température de la cloche étant portée à 80 degrés, on constate que tout le liquide s'est réduit en vapeur et que le volume occupé par cette vapeur est* $366^{cc},48$ *; le mercure s'élève à une hauteur de* $152^{mm},16$ *; la pression barométrique, ramenée à 0 degré, est* 750^{mm}. *Quelle est, à cette température, la densité de la vapeur d'éther par rapport à l'air? — Le coefficient de dilatation du mercure est* $\frac{1}{5550}$ *; le coefficient de dilatation cubique du verre est* 0,0000276 (*).

Solution. — La pression barométrique étant ramenée à 0°, ramenons de même à 0° la colonne de mercure qui s'élève dans la cloche, et dont la température est 80 degrés : la valeur de cette colonne deviendra

$$152^{mm},16 \times \frac{1}{1 + \frac{80}{5550}} = 150^{mm}.$$

Donc la force élastique de la vapeur d'éther, évaluée par la hauteur d'une colonne de mercure qui serait à 0 degré, est $750^{mm} - 150^{mm} = 600$ millimètres. — Le volume de cette vapeur qui occupe, à 80 degrés, un nombre de divisions égal à 366,48, est, en centimètres cubes, $366,48\,(1 + 0,0000276 \times 80)$; le poids du même volume d'air, dans les mêmes conditions de température et de pression, est

$$366,48\,(1 + 0,0000276 \times 80) \times 0,0015 \times \frac{600}{760} \times \frac{1}{1 + 0,00367 \times 80}.$$

La densité de la vapeur par rapport à l'air est donc

$$\frac{0,75}{366,48\,(1 + 0,0000276 \times 80) \times 0,0015} \times \frac{760}{600} \times (1 + 0,00367 \times 80) = 2,575.$$

(*) Cette méthode de détermination de la densité d'une vapeur, est connue sous le nom de méthode de Gay-Lussac.

XLIX. *Un récipient est rempli d'oxygène liquide à la température de* — 150°. *On élève la température à* + 500°. *Calculer la pression à l'intérieur du récipient, en supposant que la loi de Mariotte soit applicable.* — *On négligera la dilatation du récipient.* — *La densité de l'oxygène gazeux par rapport à l'air est* 1,10; *la densité absolue de l'oxygène liquide à* — 150° *est* 1,05.

On trouve 2081 atmosphères.

L. *Un espace de* 1 *mètre cube de capacité, entretenu à la température de* 20 *degrés, renferme de l'air humide dont l'état hygrométrique est* $\frac{5}{4}$. *La température venant à s'abaisser jusqu'à zéro, on demande de trouver le poids de la vapeur qui devra se liquéfier.* — *On prendra pour poids du mètre cube d'air, dans les conditions normales de température et de pression,* $1^{kil},295$; *pour densité de la vapeur,* 0,622; *on sait, d'ailleurs, que la tension maximum de la vapeur est, à* 20 *degrés, de* $17^{mm},591$; *à zéro, de* $4^{mm},6$.

Solution. — Le poids de la vapeur qui devra se liquéfier s'obtiendra en retranchant, du poids de la vapeur contenue à 20 degrés dans l'espace donné, le poids de la vapeur que ce même espace contient à zéro quand il est saturé. — On trouve $7^{gr},991$.

LI. *Une masse d'air qui occupe* 50 *mètres cubes, à la température de* 5 *degrés, et dont la fraction de saturation est* 0,572, *se mélange à une autre masse d'air dont le volume est* 75 *mètres cubes, la température* 15 *degrés, et la fraction de saturation* 0,480; *le volume du mélange est* 125 *mètres cubes, et sa température est* 11 *degrés. Quelle sera la fraction de saturation du mélange?* — *Les valeurs de la force élastique maximum de la vapeur d'eau à* 5 *degrés,*15 *degrés,* 11 *degrés, sont respectivement* $6^{mm},53$; $12^{mm},70$; $9^{mm},79$.

Solution. — Dans la première masse d'air, avant le mélange, la force élastique de la vapeur d'eau est, d'après les conditions de l'énoncé, $6,53 \times 0,572$. Donc, lorsque le mélange sera effectué, c'est-à-dire lorsque cette vapeur se sera échauffée de 5 degrés à 11 degrés, et qu'elle aura acquis, au lieu du volume de 50 mètres cubes, un volume de 125 mètres cubes, sa force élastique sera

$$6,53 \times 0,572 \left[1 + 0,00567\,(11 - 5)\right] \frac{50}{125} = 1^{mm},527.$$

De même, la force élastique de la vapeur contenue dans la seconde masse d'air deviendra, lorsque le mélange sera effectué,

$$12,7 \times 0,48 \left[1 - 0,00567\,(15 - 11)\right] \frac{75}{125} = 5^{mm},604.$$

En faisant la somme de ces deux forces élastiques, on obtient la force élastique totale de la vapeur d'eau dans le mélange, savoir : $5^{mm},131$. Puisque la force élastique maximum à cette température est $9^{mm},79$, la fraction de saturation est

$$\frac{5,131}{9,79} = 0,524.$$

LII. *Quelle est la masse de la quantité de mercure, qui, dans l'air, pèse* $375^{gr},185$? — *La densité du mercure est* 13.596; *la densité du laiton des poids marqués est* 8,5; *le coefficient de dilatation cubique du laiton est* 0,000051; *le coefficient de dilatation absolue du mercure est* 0,000180. *La hauteur barométrique est* 764 *millimètres; la température est* 10 *degrés; la tension maximum correspondante est* $9^{mm},17$; *enfin l'état hygrométrique actuel est* 0,8.

On trouve (156)

$$= 375,185 \frac{1 - \frac{a}{\Delta}}{1 - \frac{a}{D}}$$

a, D, et Δ représentent la masse d'un centimètre cube d'air, de mercure, et de la substance des poids marqués, dans les circonstances actuelles.

$$a = \frac{0{,}001293}{1 + \frac{10}{273}} \cdot \frac{764 - \frac{3}{8} \times 0{,}8 \times 9{,}17}{760} \qquad \Delta = \frac{8{,}5}{1{,}00031} \qquad D = \frac{13{,}596}{1{,}0018}$$

LIII. *La terre étant couverte d'une couche de neige à zéro, de* 2 *centimètres d'épaisseur, quelle est l'épaisseur de la couche de pluie tombant à* $12^0{,}5$ *qui serait nécessaire pour en déterminer la fusion? — Densité de la neige par rapport à l'eau de pluie*, 0,78; *chaleur de fusion de la neige*, 79,25.

On trouve $9^{cm},89$.

LIV. *On verse* 600 *grammes d'un liquide dont la température est* 85 *degrés. dans une masse d'eau pesant* 3 *kilogrammes, et dont la température est* 8 *degrés; cette eau est contenue dans un calorimètre en laiton, du poids de* 500 *grammes. On trouve que la température finale du métange est* 15 *degrés. — On sait d'ailleurs, par des expériences préliminaires, qu'il s'est perdu* 3 *calories par rayonnement ou par conductibilité, pendant la durée de l'expérience; la chaleur spécifique du laiton est* 0,1. *— On demande de calculer la chaleur spécifique du liquide?*

Solution. — En se refroidissant de 85 à 15 degrés, le liquide soumis à l'expérience a abandonné $600 \times c \times 70$ calories, en désignant par c la chaleur spécifique cherchée. La capacité calorifique de l'enveloppe du calorimètre est $500 \times 0{,}1 = 50$, et la capacité calorifique du calorimètre tout entier est 3050; en s'échauffant de 8 à 15 degrés, le calorimètre a donc absorbé $3050 \times 7 = 21210$ calories. — La quantité de chaleur abandonnée par le liquide est égale à la somme de la quantité de chaleur absorbée par le calorimètre et de la quantité de chaleur perdue par rayonnement ou conductibilité; on a donc :

$$600 \times c \times 70 = 21210 + 3,$$

d'où l'on tire

$$c = 0{,}505.$$

LV. *Dans un vase plat, large et horizontal, on répand* 500 *grammes d'eau à* 100 *degrés. Il s'en dégage* 30 *grammes par évaporation subite : que devient la température de cette eau? — La chaleur de vaporisation de l'eau est de* 537 *calories.*

Solution. — En se vaporisant, les 30 grammes d'eau ont absorbé $30 \times 537 = 16110$ calories, et cette quantité de chaleur a été cédée par les 470 grammes d'eau qui sont demeurés à l'état liquide; ils se sont ainsi refroidis de $\frac{16110}{470} = 34^0{,}5$. La température devient donc $100 - 34{,}5 = 65^0{,}7$.

LVI. *Sur une plaque de liège, enduite de noir de fumée et disposée sur la platine d'une machine pneumatique, au-dessus d'une cuvette contenant de l'acide sulfurique* (*fig.* 200), *on a placé une masse d'eau pesant* 10 *grammes, à la température de* 15 *degrés; on a recouvert d'une cloche de verre, et l'on a fait le vide. Au bout d'un certain temps, il reste sur la plaque un résidu de glace à* 0 *degré. Quelle est la masse de cette glace? — La chaleur de vaporisation de l'eau, à basse température, est* 600 *calories, la chaleur de fusion de la glace est* 80 *calories. On négligera les pertes de chaleur par rayonnement ou par conductibilité.*

Solution. — Soit x la masse de glace obtenue; l'évaporation de $(10 - x)$ grammes d'eau a absorbé $(10 - x)$ 600 calories. D'autre part, le refroidissement de 15 à 0 degré et la solidification de l'eau ont dégagé, pour chaque grammes d'eau, $15 + 80 = 95$ calories; le refroidissement et la solidification de x grammes d'eau correspondent donc à un dégagement de $x \times 95$ calories. On a donc

$$x \times 95 = (10 - x)\,600 \qquad \text{d'où} \qquad x = 8^{gr},655.$$

LVII. *Étant donnée une couche de neige à zéro, de 1 centimètre d'épaisseur, combien devra-t-elle recevoir de chaleur du soleil par mètre carré de superficie, pour se répandre dans l'air sous forme de vapeur saturante à 10 degrés ? — Densité de la neige, 0,78; chaleur de vaporisation à 10 degrés, 600; chaleur de fusion, 80 calories.*

On trouve $(80 + 10 + 600)\,7{,}8 = 5582$ grandes calories.

LVIII. *Quelle quantité de chaleur, au maximum, pourra céder 1 mètre cube d'air, chauffé sous la pression atmosphérique, à telle température que l'on voudra ? — Chaleur spécifique de l'air à pression constante, 0,24.*

Solution. — Un mètre cube d'air, pris à une température T, pèse

$$\frac{1^k,3}{1 + \frac{T}{273}} \quad \text{ou} \quad \frac{273 \times 1{,}3}{273 + T}.$$

Quand cette masse d'air se refroidit à pression constante jusqu'à une température t, elle cède

$$\frac{273 \times 1{,}3}{273 + T} \times 0{,}24\,(T - t) \text{ grandes calories.}$$

Quelque élevée que soit la température T, le quotient $\frac{T - t}{273 + T}$ est toujours inférieur à l'unité. Il en résulte que la quantité de chaleur que pourra céder cet air ne peut jamais dépasser $273 \times 1{,}3 \times 0{,}24$ ou 85 grandes calories.

LIX. *Une bouteille en fer, munie d'un robinet, est remplie d'un gaz liquéfié; on en laisse échapper par ébullition une masse* p^{gr}. *On demande :* 1° *de calculer le volume* V^{cc} *occupé par le gaz sorti, sous la pression* H, *et à la température* t^0; *connaissant la densité* D *du gaz par rapport à l'air;* 2° *d'exprimer la masse* q^{gr} *de gaz formé, tant à l'intérieur qu'à l'extérieur de la bouteille; on désignera par* d *et* d' *les poids spécifiques, par rapport à l'eau, du liquide et du gaz, dans les conditions où ils se trouvent dans le récipient;* 3° *quelle sera la température finale* x *de l'appareil, sa capacité calorifique totale étant celle de* M^{gr} *d'eau, si l'on suppose qu'il n'emprunte pas de chaleur au milieu ambiant; on désignera par* λ *la chaleur de vaporisation du liquide, dans les conditions de l'expérience.*

Application numérique : $p = 65^{gr}$; $M = 125^{gr}$; $H = 76^{cm}$; $t = 15^0$; $\lambda = 90$ calories; $d = 1{,}43$; $d' = 0{,}0044$; $D = 2{,}254$.

Solution. — 1° Le volume V est défini par l'équation $V \times \frac{H}{76} \times \frac{0{,}0013}{1 + \alpha t} \times D = p$.

On trouve $V = 25$ litres 645.

2° La masse de gaz formée à l'intérieur, occupe un volume $\frac{p}{d}$; et comme la densité absolue d' de ce gaz est donnée, cette masse est égale à $\frac{p}{d}\,d'$. On a donc

$$q = p\left(1 + \frac{d'}{d}\right).$$

On trouve

$$q = 65^{gr},121.$$

3° La quantité de chaleur qui a été cédée par l'appareil, $M(t - x)$, est égale à la quantité de chaleur qui a été absorbée par la masse transformée en vapeur :

$$M(t - x) = q\lambda.$$
$$x = -51°,88.$$

LX. *Un récipient clos, dont la capacité calorifique est égale à celle de* p^{gr} *d'eau, contient* l^{gr} *de ce liquide. Quelle quantité de chaleur doit-on lui fournir pour le porter de* t *à* T ? *Le volume compris entre la surface libre de l'eau et la paroi supérieure du récipient est de* V^{cc}; *on le suppose invariable. — On sait que la chaleur totale de*

vaporisation de l'eau est donnée par la formule $Q = 606{,}5 + 0{,}305\,t$. *On donne* t *et* F, *les valeurs de la tension maximum à* t^0 *et* T^0. — *La densité* d *de la vapeur d'eau est supposée constante.*

Application numérique. $t = 60^0$ $f = \frac{1}{5}$ *d'atmosphère,* $T = 120$ $F = 2$ *atmosphères,* $p = 20^{gr}$, $P = 10^{gr}$. $d = \frac{5}{8}$. $\alpha = \frac{1}{275}$. *Le volume* V *est tel qu'il peut contenir* 2^{gr} *d'air à* 0^0 *sous la pression* 76.

Solution. — Soit m^{gr} la masse d'eau vaporisée à t^0. On a

$$m = V\,\frac{f}{76} \times \frac{0{,}001293}{1 + \frac{t}{275}} \times \frac{5}{8} = 2^{gr} \times \frac{1}{5} \times \frac{5}{8}\,\frac{1}{1 + \frac{60}{275}} \qquad \text{ou} \qquad 0^{gr},205.$$

La masse d'eau liquide est donc $P - m$, ou $9^{gr},795$. On évaluerait de même la masse M^{gr} de vapeur à T^0

$$M = V\,\frac{F}{76}\,\frac{0{,}001293}{1 + \frac{T}{273}} \times \frac{5}{8} = 2^{gr},2 \times \frac{5}{8}\,\frac{1}{1 + \frac{120}{275}} \qquad \text{ou} \qquad 1^{gr},757\,;$$

la masse d'eau liquide est donc $P - M = 8^{gr},265$.

La quantité de chaleur nécessaire pour passer de t à T est évidemment égale à l'excès de la quantité de chaleur nécessaire pour passer de 0^0 à T^0, sur la quantité de chaleur qu'il faudrait fournir au système pour l'amener de 0^0 à t^0.

On a donc

$$\begin{aligned} Q^c = {} & pT + (P - M)\,T + M\,(606{,}5 + 0{,}305\,T) \\ & - pt - (P - m)\,t - m\,(606{,}5 + 0{,}305\,t). \end{aligned}$$

D'où

$$Q^c = (P + p)\,(T - t) + (M - m)\,606{,}5 - (MT - mt)\,0{,}695.$$

On trouve

$$Q = 257^c,66 \text{ petites calories.}$$

PROBLÈMES SUR L'ACOUSTIQUE

LXI. *Les plateaux d'une sirène portent chacun 25 trous; le plateau supérieur fait 2349 tours en deux minutes. Quelle est la note donnée par la sirène, sachant que le* la_3 *correspond à 435 vibrations doubles par seconde? — Quelle est la longueur du tuyau ouvert, dont le son fondamental est à l'unisson avec celui de la sirène?*

Solution. — Le nombre des vibrations effectuées par la sirène en une seconde est

$$\frac{2349 \times 25}{120} \qquad \text{ou} \qquad 489{,}375.$$

L'intervalle de cette note au *la* normal est mesuré par la fraction $\frac{489{,}375}{435} = 1{,}125$, ou, en fraction ordinaire, $\frac{9}{8}$. La note est donc *un ton* au-dessus du la_3; c'est un si_3.

La longueur d'onde correspondante à cette note (416) est $\lambda = \frac{340}{489{,}375}$. Mais, quand un tuyau ouvert donne le son fondamental, la longueur de l'onde sonore est le double de la longueur du tuyau (458). La longueur du tuyau, dont le son fondamental est le si_3, est donc $\frac{340}{2 \times 489{,}375} = 0^m,347$.

LXII. *La densité du platine étant prise égale à 22 et celle du fer à 7,8, on demande quel rapport il doit y avoir entre les longueurs de deux cordes, l'une en platine, l'autre en fer, et toutes les deux de même section, pour qu'elles soient à l'unisson quand on les tend également.*

Solution. — On doit avoir

$$\frac{l}{l'} = \sqrt{\frac{7,8}{22}} \qquad \text{ou} \qquad 0,5954.$$

LXIII. *Une corde tendue par un poids* P *est à l'unisson d'un tuyau ouvert donnant le son fondamental. — 1° Quel doit être le poids tenseur* P′, *pour que le son de la corde soit à l'octave aiguë du son fondamental du tuyau? — 2° Quel doit être le poids tenseur* P″ *pour que le son de la corde soit à la quinte de l'octave aiguë du son fondamental du tuyau? — 3° Pourrait-on faire rendre au tuyau les trois sons que donne la corde, tendue successivement par les poids* P, P′ *et* P″?

Solution. — Soient n, n' et n'' les nombres de vibrations effectuées en une seconde par la corde tendue successivement par les poids P, P′ et P″. D'après les lois des vibrations des cordes, on a :

$$\frac{n}{\sqrt{\mathrm{P}}} = \frac{n'}{\sqrt{\mathrm{P}'}} = \frac{n''}{\sqrt{\mathrm{P}''}},$$

n, n' et n'' sont entre eux comme 1, 2 et 3; par conséquent les poids tenseurs P, P′ et P″ doivent être entre eux comme 1, 4 et 9. — La corde rend successivement le son fondamental et les deux premiers harmoniques du tuyau ouvert (458).

PROBLÈMES SUR L'OPTIQUE

LXIV. *Deux sources lumineuses* S *et* S′, *dont les intensités propres sont* I *et* I′, *ont été placées à une distance* d *l'une de l'autre. En quel point faut-il placer un écran, en ligne droite avec les deux sources, pour qu'il reçoive autant de lumière de l'une que de l'autre? — Application :* I′ = 4I, $d = 3$ *mètres.*

Solution. — Représentons par x la distance de l'écran à la source S, que nous supposons de plus faible intensité que S′. Si l'écran est placé entre les deux sources, on doit avoir

$$x = \frac{d}{1 + \sqrt{\frac{\mathrm{I}'}{\mathrm{I}}}} = \frac{3}{1+\sqrt{4}} = 1 \text{ mètre.}$$

Mais l'écran peut aussi être placé en dehors de l'intervalle des deux sources, du côté de la source la moins intense. La distance x est alors

$$x = \frac{d}{\sqrt{\frac{\mathrm{I}'}{\mathrm{I}}} - 1} = \frac{3}{\sqrt{4}-1} = 3 \text{ mètres.}$$

LXV. *Deux miroirs plans* AB *et* CD (*fig.* 691), *inclinés l'un sur l'autre, ont leurs faces réfléchissantes en regard; un rayon lumineux* SI *se réfléchit d'abord sur* AB, *suivant* IH; *puis sur* CD, *suivant* HR. *Démontrer que l'angle* δ, *formé par la direction du rayon incident avec celle du rayon deux fois réfléchi, est toujours double de l'angle* α *des deux miroirs.*

Solution. — Les triangles IOR et HOM ont leurs angles en O égaux comme opposés par le sommet; donc :

$$\mathrm{OIR} + \delta = \mathrm{OHM} + \alpha.$$

Mais OHM est égal à IHC, à cause de la réflexion sur le miroir CD; IHC est égal à la somme des angles intérieurs α et HIM; enfin ce dernier angle, à cause de la réflexion sur le miroir AB, est égal à SIA, qui lui-même est égal à OIR. On voit donc que

$$\mathrm{OHM} = \alpha + \mathrm{OIR};$$

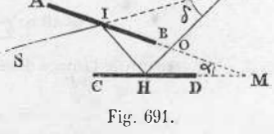


Fig. 691.

en ajoutant membre à membre ces deux égalités, et supprimant les parties communes, il vient enfin

$$\delta = 2\alpha.$$

LXVI. *Devant un miroir sphérique concave, de 2 mètres de rayon, on place une flèche lumineuse de 1 décimètre de longueur, perpendiculairement à l'axe principal et à 5 mètres du miroir. Où se forme l'image, et quelle en est la grandeur?*

On met ensuite un petit miroir plan au foyer principal du miroir sphérique, incliné de 45 degrés sur l'axe principal, et la face réfléchissante tournée vers ce miroir. Quelle image formeront les rayons réfléchis par le grand miroir sphérique, en tombant sur le petit miroir plan? Quelles en seront la grandeur et la situation? Où placer un écran pour la recevoir, ou bien une loupe pour l'observer et pour l'agrandir?

Solution. — En appliquant la formule générale (1) qui a été donnée (490), on trouve que l'image se forme à $1^m,25$ du miroir, ou à $0^m,25$ du foyer principal. D'autre part, la grandeur de l'image s'obtiendra à l'aide de la proportion (495)

$$\frac{i}{0,1} = \frac{1,25}{5}.$$

La grandeur de l'image est donc de

$$0^m,025.$$

Plaçons maintenant le petit miroir plan au foyer F. L'image, au lieu de se former dans une position perpendiculaire à l'axe principal du miroir sphérique, à $0^m,25$ au delà du foyer, sera renvoyée, par le miroir plan, dans une position symétrique de la première par rapport à ce miroir. Au point F, menons la perpendiculaire à l'axe du miroir sphérique; l'image se trouvera à $0^m,25$ du point F, sur cette perpendiculaire : elle sera parallèle à l'axe, et sa grandeur sera toujours $0^m,025$.

Pour la recevoir sur un écran, il suffira de placer cet écran à l'endroit où cette image est renvoyée par le miroir plan, c'est-à-dire parallèlement à l'axe du miroir sphérique, à $0^m,25$ du foyer F.

Pour la grossir avec une loupe, il faudra disposer cette loupe de façon que l'image soit placée entre la lentille et son foyer principal; cette dernière opération est facile, dès que l'on a déterminé la position de l'image renvoyée par le miroir plan.

LXVII. *Deux miroirs concaves* MN *et* M'N' (*fig.* 692), *dont les rayons sont respectivement de 1 mètre et de* $1^m,50$, *sont disposés en regard l'un de l'autre, de manière que leurs axes coïncident. La distance* OO' *est de 3 mètres. En quel point de l'axe commun devra-t-on placer un objet lumineux, pour que les images réelles de cet objet données par les deux miroirs soient égales?*

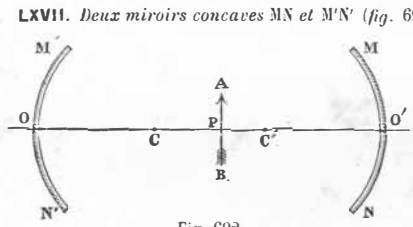


Fig. 692.

Solution. — Il est facile de voir que l'égalité des deux images réelles ne peut être obtenue, dans les conditions du problème, que si l'objet est placé dans l'intervalle des deux centres C et C'. La longueur de l'image donnée par le miroir O, à une distance p_1 du point O, est alors déterminée par les deux équations (495).

$$\frac{i}{AB} = \frac{p_1}{OP}, \qquad \frac{1}{OP} + \frac{1}{p_1} = \frac{2}{OC},$$

d'où l'on déduit

$$i = AB \times \frac{OC}{2 \times OP - OC} = AB\,\frac{OC}{OP + CP}.$$

Quant à la longueur de l'image donnée par le miroir O', on trouverait de même

$$AB\,\frac{C'O'}{PO' + PC'}.$$

Pour que les deux images soient égales, il suffit qu'on ait

$$\frac{OC}{OP + CP} = \frac{C'O'}{PO' + PC'}.$$

En ajoutant ces deux rapports terme à terme, et égalant le résultat au premier rapport, il vient

$$\frac{OC}{OP + CP} = \frac{OC + C'O'}{OO' + CC'};$$

si l'on substitue dans cette égalité les longueurs des différentes lignes qui y entrent, et si l'on remarque que CP est égal à OP — OC, on a

$$\frac{1}{2OP - 1} = \frac{2,5}{3,5} = \frac{5}{7};$$

d'où l'on déduit facilement

$$OP = 1^m,2.$$

LXVIII. *Un prisme* BAC (*fig.* 693), *dont l'angle réfringent* A *est connu, est rencontré perpendiculairement à l'une de ses faces par un rayon lumineux* RI *qui se réfracte en* H *suivant* HS. *On mesure la déviation* δ *que le rayon subit par cette réfraction. Déduire, de la connaissance des angles* A *et* δ, *la valeur de l'indice de réfraction de la substance du prisme.*

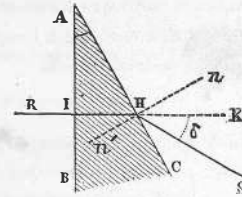


Fig. 693.

Solution. — Soit *nn'* la normale au point H ; on a :

$$\frac{\sin SHn}{\sin RHn'} = n,$$

Or les angles RH*n'* et RH*n* étant égaux à A, il vient

$$n = \frac{\sin (A + \delta)}{\sin A}$$

LXIX. *Un cube de verre, d'indice* n, *repose sur une planchette horizontale noircie. On a déposé sur la face inférieure une goutte de suif, d'indice inconnu* x *on la regarde par la face opposée à celle qui est tournée vers la lumière. En faisant varier la direction du rayon visuel, de manière que l'angle qu'elle fait avec la verticale augmente progressivement, on voit tout à coup la goutte de suif devenir lumineuse. On mesure l'angle* α *que fait alors le rayon visuel avec la verticale. Trouver* x. — *Application numérique,* $n = 1,55$, $\alpha = 65°$.

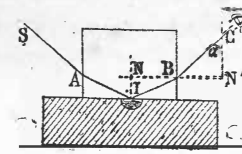


Fig. 694.

Solution. — Pour cette valeur de l'angle α, le rayon AI (*fig.* 694) subit la réflexion totale au point I ; à l'angle d'incidence AIN, dans le verre, correspond, dans le suif, un angle de réfraction égal à 90° ; on a donc

$$n. \sin NIB = x.$$

D'autre part,

$$n. \sin NBI = \sin CBN'; \quad \text{ou} \quad \cos NIB = \frac{\cos \alpha}{n}.$$

On en déduit

$$x^2 = n^2 \left(1 - \frac{\cos^2 \alpha}{n^2}\right) = n^2 - \cos^2 \alpha.$$

Dans l'application numérique de l'énoncé, on trouve $x = 1,491$.

LXX. *Un tube cylindrique, dont l'axe est vertical, est rempli d'une substance réfringente : un rayon lumineux horizontal pénètre dans ce cylindre sous une incidence* i, *se réfléchit partiellement en* H, *et revient dans l'air suivant* KR (*fig.* 695). *Quelle doit être la valeur de l'angle d'incidence* i *pour que le rayon émergent soit parallèle au rayon incident ?*

Solution. — Supposons qu'un faisceau de rayons homogènes tombe dans la direction SI, perpendiculaire à l'axe du cylindre; il est facile de voir que les réfractions et la réflexion successives ne feront pas sortir le rayon lumineux SIHKR du plan de la figure, qui est perpendiculaire à l'axe du cylindre. — Les quatre angles OIH, IHO, OHK et HKO, ont une valeur commune r, et si l'on désigne par i l'angle d'incidence SIN, par n l'indice de réfraction de la substance du cylindre, on a

$$\sin i = n \sin r.$$

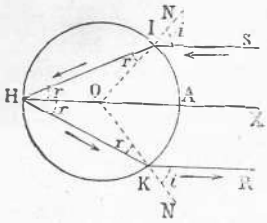


Fig. 695.

L'égalité des angles d'incidence et d'émergence est une conséquence de l'égalité des angles HIO et HKO; la figure est donc toujours symétrique par rapport à la droite HX. Pour que les droites SI et KR soient parallèles entre elles, il faut et il suffit qu'elles soient parallèles à HX; c'est-à-dire que l'angle d'incidence cherché i doit être égal à l'angle IOX dont la valeur est $2r$; on a donc $r = \frac{i}{2}$, et la relation précédente devient

$$2 \sin \frac{i}{2} \cos \frac{i}{2} = n \sin \frac{i}{2}. \qquad \sin \frac{i}{2} \left(\cos \frac{i}{2} - \frac{n}{2} \right) = 0.$$

Le problème comporte donc, en général, deux solutions :

1° $\sin \frac{i}{2} = 0$, ou $i = 0$. — Quel que soit l'indice du cylindre réfringent, le rayon XA, dont le prolongement passe par l'axe du cylindre, revient toujours sur lui-même, après avoir subi la réflexion au point H. Cette solution particulière ne fait jamais défaut.

2° $\cos \frac{i}{2} = \frac{n}{2}$. — D'une part, pour que la valeur de i soit réelle, on doit avoir $n < 2$. D'autre part, cette condition étant satisfaite, la valeur réelle de i ne convient à la question que si l'on a $i < 90^0$, et par suite $\frac{i}{2} < 45^0$, ou enfin $\cos \frac{i}{2} > \frac{\sqrt{2}}{2}$. Pour que le problème admette cette seconde solution, il faut donc qu'on ait

$$n > \sqrt{2} \qquad \text{ou} \qquad n > 1.42.$$

L'indice n étant compris entre ces deux limites, 1,42 et 2, plus la substance est réfringente, plus l'angle i est petit; l'angle i décroît de 90 degrés à zéro.

Les conditions du problème peuvent être réalisées avec un cylindre de verre ayant pour indice 1,5. — Il serait impossible de les réaliser, si on opérait avec un tube rempli d'eau, d'indice 1,33 < 1,42, ou avec un cylindre taillé dans du diamant d'indice 2,45.

LXXI. *Le trapèze* ACC'A' (fig. 696) *représente la section droite de trois prismes. Les deux extrêmes sont en crown d'indice* n, *et ils ont le même angle* α *en* A *et en* A'. *Le prisme du milieu est isocèle; il est en flint d'indice* p; *l'angle* CBC' = 2β. *Quelle relation doit-il y avoir entre* α *et* β *pour qu'un rayon* SI, *qui tombe sur le premier prisme parallèlement à* AA', *sorte du dernier sans déviation?*

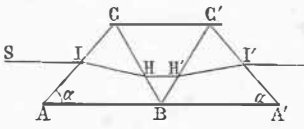


Fig. 696.

Cas particulier. $\alpha = 60^0$, $n = \frac{5}{2}$, $p = \frac{7}{4}$.

On trouve

$$\tan \beta = \frac{\left(\sqrt{n^2 - \cos^2 \alpha} - \sin \alpha\right) \cos \alpha}{p - \cos^2 \alpha - \sin \alpha \sqrt{n^2 - \cos^2 \alpha}},$$

$$\tan \beta = \frac{2\sqrt{2} - \sqrt{3}}{2\sqrt{3}\left(\sqrt{5} - \sqrt{2}\right)}; \quad \beta = 44^0\,52'\,44''.$$

LXXII. *Une droite lumineuse, de 1 centimètre de longueur, est placée à 2 mètres d'une lentille convergente, perpendiculairement à l'axe principal de cette lentille; la grandeur de l'image est alors égale à celle de l'objet. A quelle distance de la droite lumineuse faudrait-il rapprocher la lentille pour que la nouvelle image eût 10 centimètres de hauteur?*

On trouve $p = 1^m,1$.

LXXIII. *Un myope voit distinctement les objets situés à une distance au moins égale à $0^m,20$, et n'aperçoit pas aisément les objets éloignés. Avec des besicles, il voit distinctement les objets dont la distance est $0^m,60$. Quelle est la distance focale des verres de ces besicles, et à quelle distance de l'œil se forme l'image des objets placés à l'infini?*

Solution. — Les besicles du myope sont formées de lentilles divergentes, qui donnent d'un objet une image virtuelle rapprochée; soient f la longueur focale de ces lentilles, p la distance de l'objet, p' celle de l'image. On a, en général (536),

$$\frac{1}{p'} - \frac{1}{p} = \frac{1}{f}.$$

A l'objet situé à $0^m,60$, les besicles substituent une image virtuelle, située à $0^m,20$; on a donc

$$\frac{1}{0,20} - \frac{1}{0,60} = \frac{1}{f}; \qquad \text{d'où} \qquad f = 0^m,30.$$

C'est à cette distance de $0^m,30$ que se forme l'image virtuelle des objets placés à l'infini.

LXXIV. *Deux lentilles convergentes égales, ayant une distance focale de 1 mètre, sont placées à 1 mètre l'une de l'autre. Quelle position faut-il donner à un objet linéaire, perpendiculaire à l'axe commun des deux lentilles, pour que leur système forme : 1° une image réelle et renversée égale à l'objet; 2° une image réelle deux fois plus grande?*

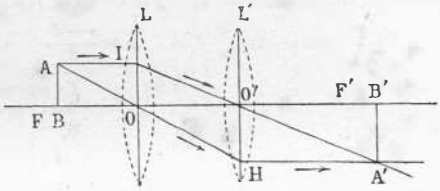


Fig. 697.

Solution. — Soient O et O' les centres optiques des deux lentilles L et L' (*fig.* 697); F et O' les foyers de la première, O et F' les deux foyers de la seconde. Construisons l'image d'un point A. Le rayon AI, mené parallèlement à l'axe principal, se réfracte à travers L suivant IO'; et ne subit aucune déviation en traversant la lentille L'. — Le rayon AOH traverse la première lentille sans déviation, et se réfracte suivant HA', parallèlement à l'axe principal de la seconde lentille. A'B' est donc l'image de AB. — Les deux triangles OAB et OHO' sont semblables, et donnent la relation

$$\frac{HO'}{AB} = \frac{OO'}{OB} \qquad \text{ou} \qquad \frac{A'B'}{AB} = \frac{OO'}{OB}.$$

Si l'on veut que l'image A'B' soit égale à l'objet AB, il faut que l'on ait $OB = OO'$, c'est-à-dire qu'il faut placer l'objet au foyer F.

Si l'on veut que $A'B' = 2AB$, il faut que $OB = \frac{OO'}{2}$; l'objet sera alors placé à égale distance de la première lentille et de son foyer.

LXXV. *Deux lentilles, l'une convergente et l'autre divergente, dont les distances focales sont respectivement 1 et 2 mètres, sont placées l'une contre l'autre, de manière que leurs axes principaux coïncident. Un objet lumineux, de 10 centimètres de hauteur, est disposé à 4 mètres du système des deux lentilles, perpendiculairement à leur axe commun. Quelles seront la position et la grandeur de l'image?*

Solution. — A la condition que l'on ait $f < F$, le système des deux lentilles accolées se comporte comme une lentille convergente, dont la longueur focale φ s'obtiendrait par la relation

$$\frac{1}{\varphi} = \frac{1}{f} - \frac{1}{F}.$$

D'après les conditions de l'énoncé, $f = 1$ et $F = 2$, on a $\varphi = 2$ mètres. La distance p' de l'image est déterminée par la relation

$$\frac{1}{p'} + \frac{1}{4} = \frac{1}{2}; \qquad \text{d'où } p' = 4 \text{ mètres.}$$

La grandeur de l'image est égale à celle de l'objet.

LXXVI. *Un objet éclairé est à une distance* s *d'un tableau blanc, sur lequel on veut projeter son image. En essayant une lentille, on trouve qu'on peut lui donner deux positions pour lesquelles la projection a lieu, et que la distance de ces deux positions est* d*; quelle est la longueur focale de cette lentille?*

Solution. — Soit p la distance de la lentille à l'objet, lorsque la projection est effectuée par la lentille dans sa première position; la distance de la lentille à l'écran est alors $s - p$, et on a (529) :

$$\frac{1}{p} + \frac{1}{s-p} = \frac{1}{f}. \tag{1}$$

D'après cette même relation, il est évident que la lentille sera dans la deuxième position, lorsqu'elle sera à la distance $s - p$ de l'objet et à la distance p de l'écran. Pour passer de la première position à la seconde, on aura donc déplacé la lentille, par rapport à l'objet éclairé, de la distance p à la distance $s - p$; le chemin parcouru par la lentille est donc $(s - p) - p = s - 2p$, et l'on a :

$$d = s - 2p, \quad \text{d'où} \quad p = \frac{s-d}{2}, \quad \text{et} \quad s - p = \frac{s+d}{2}. \tag{2}$$

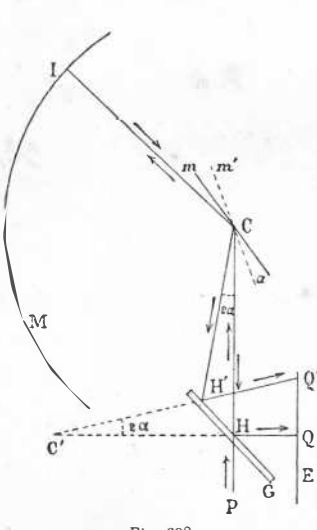


Fig. 698.

En portant ces valeurs de p et de $s - p$ dans l'équation (1), il vient :

$$\frac{1}{f} = \frac{2}{s-d} + \frac{2}{s+d} = \frac{4s}{s^2 - d^2},$$

d'où l'on tire

$$f = \frac{s^2 - d^2}{4s}.$$

LXXVII. *Un rayon lumineux, provenant d'un point fixe* P *(fig.* 698*), traverse une glace à faces parallèles* G *placée près de la source et inclinée à* 45 *degrés sur la direction du rayon; il se réfléchit sur un miroir plan* m *qui est situé au centre* C *d'un miroir concave* M*; le rayon suit donc le trajet* PCICHQ*, subissant, au retour, la réflexion sur la glace à faces parallèles; on le reçoit sur un écran* E *situé à une distance* HQ = HP*. On imprime alors au miroir plan* m *un rapide mouvement de rotation autour d'un axe passant par le centre* C *du miroir concave, et situé dans le plan du miroir* m*; on constate que le point* Q*, où le rayon réfléchi vient rencontrer l'écran, s'est déplacé en* Q'*. Connaissant le rayon* R *du miroir concave, la distance* PC = D*, la durée* T *de la rota-*

tion du miroir et le déplacement $d = QQ'$, *calculer la vitesse de la lumière.* (Méthode de Foucault.)

Solution. — Quand le rayon lumineux issu de P arrive au point C, le miroir occupe, par exemple, la position m; quand il a parcouru deux fois le chemin CI, une fois pour aller, une fois pour revenir; le miroir occupe la position m'; le rayon se réfléchit suivant CH'Q'. Soit V la vitesse de la lumière; si l'on désigne par θ le temps qu'a mis le miroir pour se déplacer de m en m', c'est-à-dire pour tourner de l'angle α, que nous supposerons évalué en minutes, on a $\theta = \frac{2R}{V}$. Or, pendant la durée T d'une rotation du miroir, celui-ci a tourné de 360 degrés, c'est-à-dire de 21 600 minutes. On a donc la proportion

$$(1) \qquad \frac{\theta}{T} = \frac{\alpha}{21\,600} \qquad \text{ou} \qquad \frac{2R}{VT} = \frac{\alpha}{21\,600}.$$

Cette équation fera connaître la valeur de V, si l'angle α est connu.

Or on a vu (478) que, si un miroir tourne d'un angle α autour d'un axe situé dans son plan, le rayon réfléchi est dévié d'un angle double; on a donc

$$HCH' = 2\alpha, \qquad \text{et par suite} \qquad QC'Q' = 2\alpha.$$

Cet angle QC'Q' peut se calculer, puisque, dans le triangle rectangle QC'Q', on connaît la base $QQ' = d$, et la hauteur $C'Q = CP = D$. On a exactement $tg\, 2\alpha = \frac{d}{D}$; et en remarquant que le petit angle 2α, évalué en minutes, est sensiblement proportionnel à sa tangente, et que d'autre part $\text{tang } 1' = \frac{1}{3438}$, on a

$$2\alpha = 3438' \times \frac{d}{D}, \qquad \alpha = 1719 \times \frac{d}{D}.$$

En remplaçant α par cette valeur dans l'équation (1), on en tire

$$V = \frac{43200}{1719} \cdot \frac{RD}{Td} \text{ (*)}.$$

LXXVIII. *Un observateur regarde le soleil avec une lunette astronomique. La distance focale de l'objectif est* $F = 70^{cm}$; *celle de l'oculaire est* $f = 4^{cm}$, *et l'œilleton est à* 4^{cm} *derrière l'oculaire. — Déterminer : 1° la mise au point; 2° le diamètre de l'image aérienne qui se forme dans le plan focal de l'objectif; 3° le grossissement et le diamètre apparent de l'image vue dans l'instrument.*

Le diamètre apparent δ *du soleil est de* 30 *minutes. La tangente de l'angle d'une minute est* $\frac{1}{3438}$.

Solution. — 1° L'œil étant placé au point F' (*fig.* 394), la distance F'P' doit être plus grande que la distance minimum de la vision distincte.

2° $\qquad 2F.\ \text{tang}\frac{\delta}{2}$, ou sensiblement $F\,tg\,\delta = 0^{cm},61$.

3° Le grossissement $\frac{F}{f}$ est 17,5; le diamètre apparent de l'image virtuelle est 8°45'.

(*) Cette méthode de détermination de la vitesse de la lumière, qui permet d'opérer sur une distance de quelques mètres seulement, est celle qui avait été employée par Foucault en 1850. Elle l'avait conduit à assigner à la vitesse de la lumière *dans l'air* la valeur 298,000 kilomètres, assez peu différente du résultat obtenu par Fizeau (592). Elle offre surtout l'avantage de s'appliquer également à la détermination de la vitesse de la lumière *dans l'eau*. Il suffit d'interposer sur le trajet CI (*fig.* 698), un tube plein d'eau; on observe alors que le déplacement QQ' devient les quatre tiers de ce qu'il était primitivement; par suite, la vitesse de propagation dans l'eau n'est que les trois quarts de la vitesse dans l'air. — Ce résultat présente, au point de vue du choix entre la théorie de *l'émission* et celle des *ondulations*, une importance capitale

LXXIX. *Le rayon de courbure* AO (fig. 699) *de la face convexe d'un ménisque convergent est égal à* r ; *l'indice du verre est* n, *et la distance du centre de courbure de la face convexe au centre de courbure de la face concave est* $OP = \frac{r}{n}$. *A un point lumineux placé au centre de courbure* P, *correspond une image* P'.

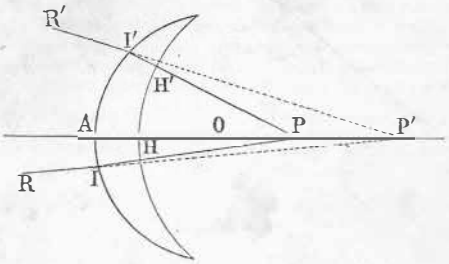


Fig. 699.

1° *Démontrer, en ne considérant d'abord que des rayons lumineux* PHI, *faisant avec l'axe principal un très petit angle, que le produit des distances* OP *et* OP' *est égal à* r^2. — 2° *Démontrer que, pour un rayon incident* PH'I', *faisant avec l'axe principal un angle quelconque, la direction du rayon émergent* I'R' *passe par le même point* P'.

Solution. — 1° On peut supposer que le rayon PHI se propage dans le verre, supposé indéfini, à droite de la surface convexe AI. Pour des rayons peu inclinés sur l'axe principal, on démontre (525) que la position du point P', conjugué de P, par rapport à la surface sphérique AI, est donnée par la relation

$$\frac{n}{AP} - \frac{1}{AP'} = \frac{n-1}{AO}.$$

On en tire

$$AP' = (n+1)r; \qquad \text{et par suite} \qquad OP' = nr.$$

Il en résulte que le produit

$$OP \times OP' = \frac{r}{n} \times nr = r^2.$$

2° Cette égalité peut s'écrire $\frac{OP}{I'O} = \frac{I'O}{OP'}$. On en conclut la similitude des deux triangles I'OP et P'OI', que l'on obtiendrait en traçant la droite OI' : ils ont un angle commun O ; et les deux côtés OP et I'O sont respectivement proportionnels aux deux côtés I'O et OP'. Par suite l'angle P'I'O = I'PO. — Or dans le triangle I'PO, on a $\frac{\sin I'PO}{\sin PI'O} = \frac{OI'}{OP} = n$: donc l'angle I'PO, et par suite son égal P'I'O n'est autre que l'angle de réfraction correspondant à l'angle d'incidence PI'O.

LXXX. *Calculer le diamètre apparent sous lequel on voit l'image d'un objet* AB (fig. 700), *à travers une loupe* L *de longueur focale* f, *le centre optique de l'œil étant*

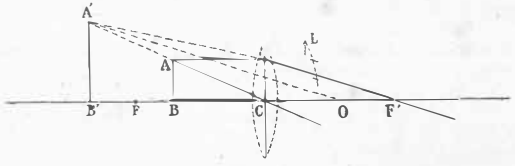


Fig. 700.

placé au point O, *à une distance* CO = *a du centre optique de la lentille, et l'image étant au point à une distance* D *de l'œil.*

Solution. — L'image A'B' est vue sous un angle A'ÔB', qui a pour mesure $\frac{A'B'}{D}$, ou $\frac{A'B'}{AB} \times \frac{AB}{D}$. Or le rapport de deux dimensions homologues de l'image et de l'objet étant

égal au rapport des valeurs absolues des distances conjuguées B'C et BC, la mesure du diamètre apparent peut s'écrire $\frac{B'C}{BC} \times \frac{AB}{D}$.

Le rapport $\frac{B'C}{BC}$ se déduit de la relation générale $\frac{1}{p} + \frac{1}{p'} = \frac{1}{f}$, dans laquelle on doit faire $p = BC$, et $p' = -B'C$ (p' est ici négatif, puisque l'image est virtuelle). On a donc

$$\frac{1}{BC} - \frac{1}{B'C} = \frac{1}{f};$$

d'où l'on tire

$$\frac{B'C}{BC} = \frac{B'C}{f} + 1 = \frac{D - a + f}{f}$$

en remarquant que $B'C = B'O - CO = D - a$. La mesure du diamètre apparent est donc en définitive,

$$AB\left[\frac{1}{f} + \frac{f - a}{fD}\right].$$

L'expression entre parenthèses caractérise la puissance de la loupe, dans les conditions spécifiées par l'énoncé.

Si le centre optique de l'œil est placé entre le point C et le point F', le second terme $\frac{f-a}{fD}$ est positif, et d'autant plus grand que D est plus petit ; pour une position déterminée de l'œil, l'observateur a donc intérêt à mettre l'image au point, à la distance minimum de la vision distincte. — Pour un même observateur, l'image étant au point à la distance minimum, la puissance de la loupe augmente quand a diminue ; l'observateur a donc intérêt à placer l'œil le plus près possible de la loupe. — Si le centre optique de l'œil coïncide avec le point F', en sorte que l'on ait $a = f$, la puissance de la loupe, égale à $\frac{1}{f}$, est indépendante de la distance à laquelle se forme l'image (note de la page 457).

PROBLÈMES SUR L'ÉLECTRICITÉ ET LE MAGNÉTISME

LXXXI. *Deux sphères métalliques, dont les rayons sont respectivement* 1 *centimètre et* 2 *centimètres, ont été électrisées, puis mises en communication par un fil métallique long et fin. Cette communication étant interrompue, et les centres des deux sphères étant à une distance de* 10 *centimètres, la répulsion mutuelle des deux sphères est de* 18 *dynes. — Trouver le potentiel et les charges des deux sphères.*

Solution. — Le potentiel est égal à 30 ; les charges des deux sphères sont respectivement 30 et 60.

LXXXII. MESURE EXPÉRIMENTALE DIRECTE DU COUPLE DE TORSION DANS LA BALANCE DE COULOMB, POUR UNE TORSION DE UN DEGRÉ. — *Une tige pesante est suspendue à l'extrémité du fil métaltique d'une balance de Coulomb, et se tient en équilibre dans la position* AB (*fig.* 701). *En deux points* M *et* M' *dont la distance au point* C *est* d, *on attache deux fils de soie qui passent l'un sur la poulie* a, *l'autre sur la poulie* a' ; *les directions* Ma *et* M'a' *sont horizontales et perpendiculaires à* AB ; *à chacun des fils on suspend une masse de* m *grammes. Pour maintenir la tige* AB *dans sa position d'équilibre, on tord le fil dans le sens des aiguilles d'une montre, d'un nombre de degrés* N *que l'on évalue par le déplacement du repère* r *sur le cercle gradué* t. *En déduire le moment du couple de torsion du fil, pour une torsion de un degré.*

Fig. 701.

Solution. — La tige AB est en équilibre sous l'action de deux couples. — D'une part, le couple constitué par deux forces égales à mg, appliquées en M et en M', aux extrémités d'un bras de levier de longueur $2d$, tend à faire tourner AB en sens inverse des aiguilles d'une montre. — D'autre part, la torsion de N°, qui a été imprimée au fil, a pour effet de développer, en raison de l'élasticité du fil, un couple qui tend à faire tourner le fil dans le sens des aiguilles d'une montre.

Les moments de ces deux couples de sens contraires sont égaux. Le moment du couple de torsion, pour une torsion de N°, est donc exprimé en unités C.G.S. par le produit

$$mg \times 2d.$$

En faisant varier les conditions de l'expérience, pour un même fil métallique OC, on trouve que l'angle de torsion N° varie proportionnellement au produit $mg \times 2d$.

Pour une torsion de un degré, le moment du couple de torsion est donc

$$C_1 = \frac{2mgd}{N} \text{ (*)}.$$

Application numérique : $d = 1^{cm},5$ $m = 0^{gr},5$ $N = 350^0$.

On trouve

$$C_1 = \frac{2 \times 0,5 \times 980 \times 1,5}{350} = 4,2.$$

LXXXIII. MESURE DES CHARGES ET DES POTENTIELS AU MOYEN DE LA BALANCE DE COULOMB. — *Le moment* C_1 *du couple de torsion du fil d'une balance de Coulomb, exprimé en unités* C. G. S., *est de* 0,28, *pour un degré de torsion; la longueur* ob *de la moitié de l'aiguille* (*fig.* 702) *est* $l = 10^{cm},2$; *les boules* a *et* b *ont* 1^{cm} *de diamètre. — Après avoir électrisé la boule* a, *en la mettant en communication par un long fil conducteur avec un conducteur électrisé à un potentiel inconnu* V, *on la transporte dans la balance, au contact de la boule mobile; immédiatement après le contact, celle-ci est repoussée. En tordant le bouton supérieur de* 20° *en sens inverse de la déviation, on ramène la boule mobile en* b, *à une distance angulaire de* 36°. — *On demande de calculer : 1° la force répulsive* f *qui s'exerce entre les deux boules*; 2° *la charge* q *que possédait la boule* a *quand elle a été introduite dans la balance*; 3° *le potentiel* V *du conducteur qui a servi à la charger.*

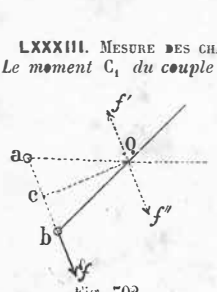


Fig. 702.

Solution. — 1° Lorsque la boule mobile est en équilibre, en *b*, la torsion du fil est $T = 36^0 + 20^0$, ou 56^0; et le moment du couple dû à la torsion est égal à C_1T. — La force répulsive *f*, qui s'exerce entre *a* et *b'*, peut être supposée appliquée au point *c*, milieu de *ab* considéré comme lié à *ob*. On ne change pas l'état d'équilibre, en appliquant au point *o* deux forces *f'* et *f''* directement opposées, égales et parallèles à *f*. Les deux forces *f* et *f'* constituent un couple, de bras de levier $oc = l \cos \frac{\alpha}{2}$, en désignant par α la déviation *aob*, qui est ici de 56°. Ce couple étant égal au couple de torsion et de sens contraire, on a

$$fl \cos \frac{\alpha}{2} = C_1 T.$$

On trouve

$$= 1 \text{ dyne } 616.$$

2° La charge *q*, que possédait la boule *a* quand elle a été introduite dans la balance, s'est partagée en deux parties égales à $\frac{q}{2}$, au moment du contact de *a* avec *b*; la distance des deux boules *a* et *b'*, étant $2l \sin \frac{\alpha}{2}$, on a (645)

$$f = \frac{q^2}{4} \frac{1}{4l^2 \sin^2 \frac{\alpha}{2}},$$

d'où l'on tire $q = 16$ unités électrostatiques C.G.S.

(*) Pour déterminer C_1, on emploie préférablement un autre procédé susceptible d'une plus grande précision. — Après avoir fixé le fil à son extrémité supérieure, on le tend en suspendant à son extrémité inférieure une tige pesante AB dont on connaît la masse et les dimensions. Quand on écarte cette tige de sa position d'équilibre, elle y est ramenée par la torsion du fil ; elle effectue des oscillations *isochrones*. On mesure la durée d'une oscillation. — Au moyen de ces diverses données, la théorie permet de calculer C_1.

3° Lorsque la boule a, de rayon r, possède une charge q, son potentiel est $V = \frac{q}{r}$; c'est aussi le potentiel du conducteur avec lequel cette sphère était en communication. On a donc $V = \frac{16}{0.5} = 32$ ergs.

LXXXIV. Principe de l'électromètre absolu de sir W. Thomson. — *Deux disques métalliques,* A *et* BB' (*fig.* 705), *sont disposés horizontalement, à une distance de* e^{cm} ; *la portion centrale* B *du disque supérieur porte des poids marqués et constitue l'un des plateaux d'une balance, dont l'autre plateau porte une tare qui a été réglée de telle sorte que le fléau se tienne horizontal quand les deux conducteurs* A *et* BB' *sont à l'état neutre. — On met* A *en communication avec le sol, et on fait communiquer le système* BB', *par un long fil métallique, avec un conducteur électrisé au potentiel* V : *le plateau* B *s'abaisse; pour ramener le fléau à l'horizontalité, on retire* p^{gr} *du plateau* B. — *Calculer* V *en unités électrostatiques* C.G.S.

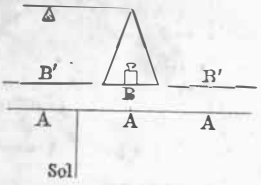


Fig. 705.

Solution. — Soit μ la densité électrique en tous les points de la surface inférieure du plateau BB' ; et soit S la surface du plateau B. Ce plateau est sollicité de haut en bas par la résultante $2\pi\mu^2 S$ des tensions électrostatiques (655) ; cette force remplace le poids pg de la masse p^{gr} qui a été enlevée. On a donc

$$pg = 2\pi\mu^2 S. \qquad (1)$$

L'espace compris entre les deux disques constitue un champ électrique uniforme, dans lequel les lignes de force sont verticales, la force électrique ayant la même valeur F en tous les points du champ. En remarquant que les surfaces de niveau BB et A, distantes de e, sont aux potentiels V et zéro, on est conduit à prendre comme valeur de la force électrique (662), l'expression

$$\frac{V - 0}{e} \quad \text{ou} \quad \frac{V}{e}.$$

D'autre part, d'après le théorème de Coulomb (654), la force électrique, dans le voisinage de la surface BB', est exprimée par $4\pi\mu$. On a donc l'équation

$$\frac{V}{e} = 4\pi\mu. \qquad (2)$$

En éliminant μ entre les équations (1) et (2), il vient

$$V = 2e\sqrt{\frac{2\pi g}{\frac{1}{2}S}}\sqrt{p}.$$

LXXXV. Couple de torsion d'un système bifilaire, pour une petite déviation. — *Une tige pesante* mn (*fig.* 704), *de masse* M^{gr}, *est suspendue par deux fils verticaux* oa, o'b, *de longueur* l^{cm}, *dont la distance est* 2*a; sous l'action d'un couple de forces électriques ou magnétiques, la tige* mn *est déviée d'un petit angle* α, *et se tient en équilibre en* m'n' ; *on demande d'évaluer le moment du couple qui produit cette déviation.*

Solution. — Le poids Mg de la tige peut être remplacé par deux forces verticales p et p', égales à $\frac{Mg}{2}$, et appliquées aux points a' et b'. La force p se décompose en deux forces : l'une q, dirigée suivant le prolongement de oa', a pour effet de tendre le fil ; l'autre r, horizontale et perpendiculaire à $m'n'$, tend à ramener la tige

en *mn*. De même la force p' est remplacée par ses deux composantes q' et f'. Ce sont les deux forces f et f' qui constituent le couple antagoniste du couple des forces (électriques ou magnétiques) qui ont produit la déviation α.

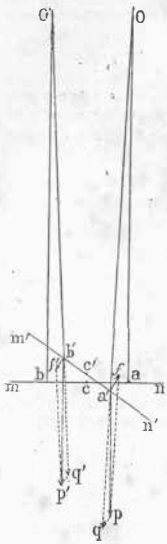


Fig. 704.

Soit β l'angle aoa', qui est beaucoup plus petit que l'angle α. On a

$$f = p \operatorname{tang} \beta, \qquad \text{ou sensiblement} \qquad f = \frac{Mg}{2}\beta.$$

Le bras de levier du couple $fa'b'f'$ étant égal à $2a$, le moment de ce couple a pour mesure

$$\frac{Mg}{2}\beta \times 2a, \qquad \text{c'est-à-dire} \qquad Mag\beta.$$

C'est aussi la mesure du couple antagoniste.

Or, lorsque l'angle α ne dépasse pas quelques degrés, et lorsque *l est très grand par rapport* à *a*, on peut négliger le petit déplacement vertical cc' du milieu de la tige *mn*. La petite distance aa' peut alors être évaluée de deux manières : dans le triangle aca', cette distance est exprimée par le produit $a.\alpha$; dans le triangle aoa', elle est exprimée par le produit $l\beta$. De l'égalité de ces deux expressions on tire $\beta = \frac{a\alpha}{l}$.

Le moment du couple qui produit la torsion a donc pour mesure $\frac{Mga^2}{l}.\alpha$. — Il est proportionnel à l'angle de déviation α, tant que cet angle ne dépasse pas quelques degrés.

LXXXVI. *Les groupes de secteurs* aa' *et* bb' *d'un électromètre à quadrant* (*fig.* 460), *sont portés respectivement aux potentiels* V_1 *et* V_2; *la plaque mobile* mn, *chargée au potentiel* V, *se déplace alors d'un angle* α. — *Démontrer que la déviation* α *est proportionnelle à l'expression* $(V_1 - V_2)\left(V - \frac{V_1 + V_2}{2}\right)$.

Solution. — Supposons que l'on ait $V > V_1 > V_2$; la plaque *mn*, électrisée positivement, s'est déplacée d'un angle α, vers les secteurs *b* et *b'*, qui sont au plus faible potentiel. Il existe à l'intérieur des quadrants un champ électrique, dans lequel les lignes de force sont dirigées dans le sens des potentiels décroissants, de la plaque à chacun des secteurs; mais la force électrique n'a pas partout la même valeur.

A l'intérieur des quadrants *b* et *b'*, les conducteurs électrisés étant aux potentiels V et V_2, la force électrique est proportionnelle à $V - V_2$; aux divers points de la plaque *mn*, qui sont dans cette région, la densité électrique ρ, proportionnelle à la force électrique, est donc proportionnelle à $V - V_2$; et enfin la tension électrostatique $2\pi\rho^2$, est, pour chacun des points de *mn* compris dans cette région, proportionnelle à $(V - V_2)^2$. Or si l'on considère la partie de *mn* qui est à l'intérieur du quadrant *b*, la résultante des tensions électrostatiques qui s'exercent sur les deux faces horizontales, supérieure et inférieure, est nulle; mais la résultante des tensions électrostatiques relatives à la surface verticale de très petite hauteur, qui limite *mn* sur le bord, est une force F, qui tend à accroître la déviation α. — Il en est de même pour la région de *mn* qui est à l'intérieur du quadrant *b'*, opposé à *b*. Une force égale à F, mais de sens contraire, tend aussi à faire décroître la déviation α. — Ces deux forces égales à F et de sens contraires constituent un couple dont le moment est proportionnel à $(V - V_2)^2$.

On démontrerait de même, en considérant les tensions électrostatiques aux points de *mn* qui sont compris à l'intérieur des quadrants *a* et *a'*, qu'un couple proportionnel à $(V - V_1)^2$ s'oppose à la déviation.

Le couple résultant des forces électriques est donc, en définitive, proportionnel à

$$(V - V_2)^2 - (V - V_1)^2 = 2\left[V - \frac{V_1 + V_2}{2}\right](V_1 - V_2).$$

Il est neutralisé par le couple de torsion du bifilaire, lequel est proportionnel à α. — On a donc, en désignant par C un coefficient constant pour le même appareil,

$$\alpha = C\left[V - \frac{V_1 + V_2}{2}\right](V_1 - V_2).$$

Quand on fait $V_2 = -V_1$ (c'est la disposition (678) qui a été indiquée), il vient

$$\alpha = 2CV_1V.$$

La sensibilité est d'autant plus grande que V_1 est plus grand, c'est-à-dire que la pile qui sert à charger l'électromètre renferme un plus grand nombre d'éléments.

On emploie quelquefois l'électromètre en reliant les secteurs *bb'* au sol, et en mettant les secteurs *aa'*, ainsi que la plaque *mn*, en communication avec la source dont on veut déterminer le potentiel V. On a alors $V_2 = 0$ et $V_1 = V$; la formule précédente donne $\alpha = \frac{C}{2}V^2$. Quel que soit le signe de V, le sens de la déviation est toujours le même. Cette disposition conviendrait pour mesurer la différence de potentiel aux deux bornes d'une machine d'induction, qui fournirait des courants alternatifs.

LXXXVII. *Évaluer la capacité d'un microfarad avec l'unité électrostatique* C. G. S. *de capacité.*

Solution. — Dans la relation $Q = VC$, si C représente la capacité du microfarad, V étant 1 volt, Q représente la millionième partie du coulomb. — Avec les unités électrostatiques, $V = \frac{1}{300}$, et $Q = 3 \times 10^5$. On en tire $C = 9 \times 10^5$.

Le microfarad est donc la capacité d'un conducteur sphérique de 900 000 centimètres de rayon, ou de 9 kilomètres de rayon.

LXXXVIII. *Calculer la surface d'un condensateur à lame d'air dont la capacité est d'un microfarad; l'épaisseur de la couche d'air est d'un millimètre.*

Solution. — On a, pour un pareil condensateur,

$$C = \frac{S}{4\pi e} \quad \text{d'où} \quad S = 4\pi eC.$$

En faisant usage des unités électrostatiques, $e = 0{,}1$ et $C = 9 \times 10^5$. Il vient alors

$$S = 1\,130\,900 \text{ cent. q.} \quad \text{ou} \quad 113 \text{ mq } 09 \text{ environ.}$$

LXXXIX. *Calculer la surface d'un condensateur à lame de mica, dont la capacité est d'un microfarad. — L'épaisseur de la lame de mica est d'un cinquième de millimètre. Le pouvoir inducteur spécifique du mica est* $k = 8$.

Solution. — On a

$$C = \frac{kS}{4\pi e} \quad \text{d'où} \quad S = \frac{4\pi eC}{k},$$

$$S = 28\,270 \text{ cent. q.} \quad \text{ou environ } 2 \text{ mq } 827.$$

XC. *Un condensateur à lame d'air, dont les plateaux sont distants de 3 cent. a une capacité égale à 200 unités électrostatiques* C.G.S. *Que deviendra cette capacité si l'on rapproche ces plateaux, en les appliquant sur les deux faces d'une lame isolante de 1^{mm} d'épaisseur? — Le pouvoir diélectrique de la substance est égal à 5.*

On trouve

$$C = 200 \times \frac{3}{0{,}1} \times 5 = 30\,000.$$

XCI. *Une première sphère conductrice, de 25^{cm} de rayon, est au potentiel 10; une deuxième sphère, de 10^{cm} de rayon, est au potentiel 5; on les met en communication par un fil conducteur long et fin. Quel sera le potentiel commun aux deux sphères? — Quelle était l'énergie électrique initiale, et qu'est-elle devenue après la communication?*

Solution. — Les charges initiales des deux sphères sont 250 et 50; après l'établissement de la communication, la charge totale, égale à 300, est répartie sur un conducteur unique, dont la capacité est $25 + 10 = 35$; le potentiel final est donc $\frac{300}{35} = 8{,}571$.

L'énergie initiale était de

$$\frac{250 \times 10}{2} + \frac{50 \times 5}{2} = 1375 \text{ ergs};$$

après la communication, l'énergie est devenue

$$\frac{300 \times 8{,}571}{2} = 1285 \text{ ergs}.$$

Elle a diminué de 90 ergs : une quantité de chaleur équivalente a été dégagée dans le fil conducteur, quand l'électricité a passé de la première sphère sur la seconde.

XCII. *Les deux armatures d'un condensateur d'un microfarad ont été mises en communication, l'une avec le sol, l'autre avec une source au potentiel de* 1000 *volts. On décharge ensuite le condensateur à travers un fil métallique fin, dont la capacité calorifique est égale à celle de* $0^{gr},00064$ *d'eau. Quelle sera l'élévation de la température du fil, en admettant que toute l'énergie électrique qui a disparu après la décharge s'est transformée en chaleur produite dans le fil?*

Solution. — La capacité électrique du condensateur étant de C farads, le potentiel étant de V volts, l'énergie électrique avant la décharge est $\frac{CV^2}{2}$ joules. — Soit c la capacité calorifique du fil métallique et t l'accroissement de sa température; $ct \times 4{,}17$ joules est l'énergie calorifique qui apparaît après la décharge. On a donc

$$ct \times 4{,}17 = \frac{CV^2}{2} \qquad \text{d'où l'on tire} \qquad t = 187°.$$

XCIII. *Une bouteille de Leyde est chargée; soit* W *son énergie électrique. Elle est montée ensuite avec* $(n - 1)$ *bouteilles semblables, non chargées, de manière à former une batterie. Montrer que l'énergie électrique du système est devenue* $\frac{W}{n}$.

XCIV. *Deux plateaux* A *et* B, *distants de* e, *sont électrisés à des potentiels différents* V_1 *et* V_2; *on suppose* $V_1 > V_2$. *Quel est le potentiel en un point* M *situé entre les deux plateaux, à une distance* d *du plateau* A? — *On place en ce point une petite sphère conductrice de rayon* r, *et après l'avoir mise en communication avec le sol, on la retire. Quelle est sa charge?*

XCV. *Une sphère conductrice, de rayon* R, *a été chargée à un potentiel* V, *puis isolée dans une enceinte conductrice, dont les parois reliées au sol sont très éloignées de la sphère. Quel est le potentiel à une distance* D *du centre de la sphère, et comment pourra-t-on le vérifier?*

XCVI. *Calculer les quantités d'électricité qui interviennent dans les décharges alternatives d'un condensateur sphérique, à lame d'air.*

Solution. — Soit R et $R + e$ les rayons des armatures A et B. Le condensateur ayant été chargé avec une source au potentiel V, les charges égales et contraires de A et de B sont telles que le potentiel de A soit égal à V. On a donc

$$V = \frac{Q}{R} - \frac{Q}{R + e}, \qquad \text{d'où} \qquad Q = \frac{VR(R + e)}{e}$$

Après avoir isolé le condensateur, on touche A, de manière à l'amener au potentiel zéro; il y restera une charge Q_1, telle que l'on ait :

$$0 = \frac{Q_1}{R} - \frac{Q}{R + e}, \qquad \text{d'où} \qquad Q_1 = Q\,\frac{R}{R + e}.$$

La quantité d'électricité $Q - Q_1$, disparue dans l'étincelle tirée de A, est donc

$$q_1 = Q\frac{e}{R+e} = VR.$$

C'est précisément la charge qu'aurait prise la sphère A, si on l'avait chargée avec la même source, après avoir éloigné le condenseur B.

On isole A, et on touche B ; il ne peut plus rester sur l'enveloppe conductrice B qu'une charge égale et contraire à Q_1 ; la deuxième étincelle tirée de B, fait donc disparaître autant d'électricité négative, qu'il a disparu d'électricité positive dans l'étincelle tirée de A.

Après 2 étincelles, on est ramené à l'état initial ; seulement la charge de chaque armature est réduite dans le rapport $\frac{R}{R+e}$.

En résumé, les décharges font disparaître des quantités d'électricité qui vont en décroissant suivant une progression géométrique,

$$q_1, \quad q_1\frac{R}{R+e}, \quad q_1\left(\frac{R}{R+e}\right)^2 \cdots$$

XCVII. *Les deux armatures d'un condensateur sont mises en communication avec deux sources électriques aux potentiels* V_1 *et* V_2 ; *la surface du condensateur est* S, *l'épaisseur de la lame d'air isolante est* e. *Évaluer la charge prise par chacune des armatures.*

Solution. — Puisque les phénomènes électriques ne dépendent que des différences de potentiel (662. *Rem.*), tout se passera comme si l'une des armatures était au potentiel zéro, et l'autre à un potentiel $V = V_1 - V_2$. La charge prise par chaque armature est donc

$$\pm q = \pm\frac{S}{4\pi e}(V_1 - V_2).$$

La capacité du condensateur est $C = \frac{S}{4\pi e}$; on peut en donner la définition suivante, qui est générale. C'est la grandeur des charges positive et négative qu'il faut donner respectivement aux deux armatures, pour établir entre elles une différence de potentiel égale à l'unité.

On peut obtenir ce résultat directement. Soit F la force électrique, dans l'épaisseur d'air comprise entre les deux armatures ; elle est dirigée dans le sens des potentiels décroissants, et est égale à $\frac{V_1 - V_2}{e}$; soit μ la densité sur l'armature qui est au potentiel V_1 ; puisque les lignes de force partent de cette armature, μ est positif, et

$$F = 4\pi\mu, \qquad \text{ou} \qquad \mu = \frac{V_1 - V_2}{4\pi e}.$$

De même, μ' étant la densité en tous les points de l'autre armature, au potentiel V_2, on aurait

$$\mu' = \frac{V_2 - V_1}{4\pi e} = -\mu.$$

Les charges des deux armatures, de surface S, sont donc

$$\pm Q = \pm\frac{V_1 - V_2}{4\pi e}S = \pm C(V_1 - V_2),$$

en posant $C = \frac{S}{4\pi e}$.

XCVIII. *Des bouteilles de Leyde, de même capacité* C, *au nombre de* n, *sont disposées en batterie : toutes les armatures extérieures étant reliées au sol, on fait communiquer l'ensemble des armatures intérieures avec une source électrique au potentiel* V. *Évaluer l'énergie électrique de la batterie chargée à refus.*

On réunit ensuite les bouteilles en cascade ; c'est-à-dire que l'armature intérieure de chaque bouteille communique avec l'armature extérieure de celle qui précède ; ces

deux armatures constituent un conducteur isolé. L'armature extérieure de la dernière bouteille est au sol ; on fait communiquer l'armature intérieure de la première bouteille avec la source au potentiel V. *Évaluer l'énergie électrique du système chargé à refus.*

Solution. — Dans la première disposition, la capacité de l'armature intérieure de la batterie est nC, le potentiel est V, la charge est $Q = nCV$, et par suite, l'énergie

$$\frac{VQ}{2} = \frac{nCV^2}{2}.$$

Dans la deuxième disposition, il est facile de voir que l'énergie du système réside tout entière dans l'armature intérieure de la première bouteille. — En effet, le conducteur constitué par la réunion de l'armature intérieure d'une bouteille et de l'armature extérieure de la bouteille qui précède est à l'état neutre, avant la charge; il est isolé pendant la durée de la charge; donc il ne peut s'électriser que par influence, en prenant deux charges égales et contraires dans deux régions opposées; sa charge totale est donc nulle, et par suite son énergie est nulle. — Quant à l'armature extérieure de la dernière bouteille, puisqu'elle est reliée au sol, la valeur du potentiel est zéro, et l'énergie est nulle, quelle que soit la charge de cette armature.

Soit q la charge de l'armature intérieure de la première bouteille, l'énergie du système est donc $\frac{Vq}{2}$. Il reste à évaluer q.

Lorsque l'équilibre est établi, puisque l'armature extérieure de la première bouteille enveloppe complètement l'armature intérieure, dont la charge est $+ q$, il s'est développé, par influence, sur cette armature extérieure, une charge $- q$, égale et contraire à la charge inductrice; par suite, une charge $+ q$ a été induite dans l'armature intérieure de la seconde bouteille; et ainsi de suite. On voit ainsi que les armatures intérieures de toutes les bouteilles possèdent une charge $+ q$, et que les armatures extérieures possèdent une charge égale et contraire.

Soient V, V_1, V_2.... V_n, zéro, les potentiels décroissants des conducteurs que l'on rencontre successivement dans le système, en allant de l'armature intérieure de la première bouteille, qui est au potentiel V, à l'armature extérieure de la dernière bouteille, qui est au potentiel zéro, ces conducteurs étant séparés par les lames de verre des bouteilles successives. — Les bouteilles étant identiques, les chutes de potentiel $V - V_1$, $V_1 - V_2$, etc., sont égales; il en résulte que chacune de ces différences est égale à $\frac{V}{n}$.

La grandeur q des charges positive et négative que possèdent les armatures de la première bouteille est donc (*Probl.* XCVII) $q = C\frac{V}{n}$.

L'énergie du système est $\frac{CV^2}{2n}$.

Remarque. — Soit U la différence de potentiel qu'il faudrait établir entre les deux armatures de l'une des bouteilles, pour que la décharge s'effectuât à travers la lame de verre.

La disposition *en batteries* convient lorsque la machine fournit de l'électricité à un potentiel V inférieur à U, avec un débit considérable. Pour charger la batterie à refus, la machine doit fournir une quantité d'électricité $Q = nCV$ proportionnelle au nombre des bouteilles; l'énergie électrique acquise, $\frac{nCV^2}{2}$, est aussi proportionnelle à n.

La disposition *en cascade* s'impose toutes les fois que la machine fournit de l'électricité à un potentiel V supérieur à U. Pour éviter la rupture du verre, on doit faire usage d'un nombre n de bouteilles d'autant plus grand que V est plus grand. On doit avoir, en effet,

$$\frac{V}{n} < U; \qquad \text{d'où} \qquad n > \frac{V}{U}.$$

La quantité d'électricité fournie par la machine, $\frac{CV}{n}$, étant en raison inverse du nombre

des bouteilles, la durée de la charge diminue à mesure que le nombre des bouteilles augmente; mais l'énergie $\frac{CV^2}{2n}$ communiquée au système diminue également.

XCIX. *Un barreau aimanté, suspendu dans la balance de Coulomb, se tient en équilibre dans le méridien magnétique, le fil qui le supporte n'ayant aucune torsion. En faisant tourner progressivement le tambour* c (*fig.* 511), *dans le sens des aiguilles d'une montre, on amène le barreau à s'écarter progressivement de la direction du méridien magnétique, mais l'angle qui mesure la déviation du barreau est toujours moindre que l'angle qui mesure la rotation du tambour* c; *pour amener le barreau perpendiculairement au méridien magnétique, il a fallu faire tourner le tambour* c *de* N *degrés. Connaissant* C_1 *le moment du couple de torsion, pour une torsion de un degré* (*Probl. LXXXII*), *en déduire le produit* MH *du moment magnétique* M *du barreau par la composante horizontale* H *de l'intensité magnétique terrestre au lieu de l'expérience.*

Solution. — Quand le barreau est perpendiculaire au méridien magnétique, le couple des actions magnétiques qui le sollicite est MH; le couple de torsion est $C_1(N - 90)$. On a donc

$$MH = C_1(N - 90).$$

C. *Une petite aiguille aimantée, mobile autour d'un axe vertical* O, *est orientée dans le méridien magnétique* OC (*fig.* 705). *Un barreau aimanté* AB, *est placé perpendiculairement au méridien, à une distance* $OC = r$. *L'aiguille mobile est déviée d'un angle* α. *En déduire le rapport* $\frac{M}{H}$ *du moment magnétique* M *du barreau* AB *à la composante horizontale* H *de l'intensité magnétique terrestre au lieu de l'expérience.*

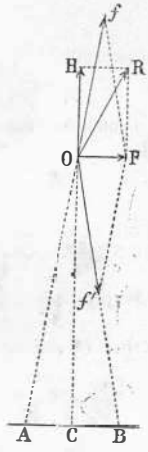


Fig. 705.

Solution. — Soient A et B les deux pôles, m la masse magnétique de chacun d'eux. Une masse magnétique australe égale à l'unité, et placée au point O, serait sollicitée : 1° par la force H; 2° par une force répulsive $f = \frac{m}{AO^2}$; 3° par une force attractive f' égale à la précédente. Soit F la résultante de f et de f'; soit R la résultante de F et de H. C'est dans la direction de R que s'orientera l'aiguille aimantée; la déviation observée α est égale à l'angle HOR. On a donc :

$$\text{tang } \alpha = \frac{F}{H}.$$

Mais les triangles fOF et OAB sont semblables :

$$\frac{F}{AB} = \frac{f}{AO}; \qquad \text{par suite,} \qquad \text{tang } \alpha = \frac{f}{H} \times \frac{AB}{AO} = \frac{m \times AB}{H \times AO^3},$$

et comme AO ne diffère pas sensiblement de r, on a sensiblement

$$\text{tang } \alpha = \frac{M}{H} \cdot \frac{1}{r^3}, \qquad \text{d'où} \qquad \frac{M}{H} = r^3 \text{ tang } \alpha.$$

Puisque l'on sait mesurer $\frac{M}{H}$ et MH (Problème XCIX), le produit de ces deux nombres donne M^2; le quotient du second par le premier donne H^2. On en déduit M et H. — C'est la méthode de Gauss.

CI. *En un point de l'équateur magnétique, l'intensité magnétique du champ terrestre est horizontale; évaluée dans le système d'unité C. G. S., elle est égale à* 0,35 *En déduire le moment magnétique* M *de la Terre, et son intensité d'aimantation* A. *On admettra que la Terre est une sphère dont la circonférence a* 40 *millions de mètres.*

Solution. — Supposons que dans la figure 705, les points A et B, distants de $2a$, représentent les pôles de l'aimant terrestre; C étant le centre de la Terre, et O un point de l'équateur magnétique.

L'unité de pôle austral, placée en O, est sollicitée par deux forces f et f' égales à $\frac{m}{AO^2}$, en représentant par m la masse magnétique de chaque pôle. La résultante F de ces deux forces est l'intensité magnétique du champ terrestre, en un point de l'équateur magnétique. Or les triangles semblables fOF et OAB donnent :

$$\frac{F}{f} = \frac{AB}{AO}, \qquad \text{d'où} \qquad F = \frac{m \times AB}{AO^3}, \qquad \text{ou} \qquad \frac{M}{AO^3};$$

et par suite, en remarquant que AO ne diffère pas sensiblement du rayon de la Terre, on aura

$$M = F.R^3.$$

R doit être évalué en centimètres; le quart de la circonférence de la Terre vaut 10 millions de mètres, ou 10^9 centimètres; on a donc

$$\frac{\pi R}{2} = 10^9 \qquad \text{d'où} \qquad R = \frac{2 \times 10^9}{\pi};$$

et par suite,

$$M = 0{,}55 \times \frac{2^3 \times 10^{27}}{\pi^3} = 8{,}5 \times 10^{25}.$$

L'intensité d'aimantation de la Terre est

$$A = \frac{M}{\frac{4}{3}\pi R^3} \qquad \text{ou} \qquad A = \frac{3F}{4\pi} = 0{,}079.$$

CII. *Un barreau d'acier, pesant* 662^{gr}, *a un moment magnétique égal à* 15 358 *unités C.G.S.; la densité de l'acier est* 7,8; *évaluer l'intensité d'aimantation de ce barreau.*

On trouve
$$\frac{15358 \times 7{,}8}{662} = 181.$$

CIII. *Un aimant* AB (fig. 706), *de moment magnétique égal à M, est placé dans un champ uniforme, d'intensité magnétique égale à* F, *et maintenu dans une direction perpendiculaire aux lignes de force. Évaluer le moment du couple qui sollicite l'aimant.*

Sous l'action de ce couple, l'aimant, devenu entièrement libre, s'oriente dans la direction des lignes de force. Évaluer le travail effectué.

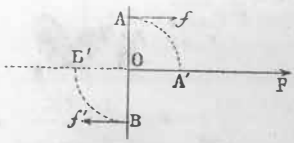


Fig. 706.

Solution. — Soient m la masse magnétique de chaque pôle, et $2a$ la distance des deux pôles A et B. Chacun des pôles A et B est sollicité par l'une des forces f et f', égales à mF, et de sens contraires. Le moment du couple fABf', est donc

$$m\text{F} \times 2a = \text{MF},$$

en remarquant que $M = 2am$.

Lorsque l'aimant AB devient libre, il tourne autour de son centre O; A vient en A' et B vient en B'. Le travail effectué par la force f constante en grandeur et en direction est égal à $f \times$ OA', produit de cette force, par la projection OA' du chemin parcouru AA' sur la direction OF de la force.

De même le travail effectué par la force f' est égal à $f \times$ OB'. Le travail total est donc

$$f \times A'B' = f \times 2a = \text{MF}.$$

Remarque. — D'une manière générale, le moment d'un couple mesure le travail effectué par les forces du couple, quand le bras de levier, d'abord perpendiculaire à la direction des forces, s'oriente dans cette direction.

CIV. *Une pile de force électromotrice* $E = 1{,}48$ *volt a une résistance intérieure* $R = 1{,}5$ *ohm: elle est fermée par un fil de cuivre de résistance* $r = 2$ *ohms. Quelle est la différence de potentiel aux deux pôles de la pile?*

Solution. — On a :

$$\frac{v}{r} = \frac{E}{R + r}, \qquad \text{d'où} \qquad v = 0{,}9 \text{ volt.}$$

CV. *La différence de potentiel prise aux deux pôles d'un élément de pile, en circuit ouvert, est* $E = 1{,}52$ *volt; on ferme la pile sur un circuit de résistance* $r = 5$ *ohms; la différence de potentiel aux deux pôles devient alors* $v = 1{,}35$ *volt. Quelle est la résistance* R *de cet élément de pile?*

Solution. — On a :

$$\frac{v}{r} = \frac{E}{R + r}, \qquad \text{d'où l'on déduit} \qquad R = 0{,}63 \text{ ohm.}$$

CVI. *On monte* 60 *éléments de Bunsen en* 5 *séries de chacune* 12 *éléments, puis on réunit ces* 5 *séries en une batterie; quelle est l'intensité du courant, la résistance du circuit extérieur étant de* 10 *ohms? Pour chaque élément Bunsen* $e = 1{,}9$ *volt,* $\rho = 0{,}1$ *ohm.*

Solution. — On a :

$$i = \frac{12 \times 1{,}9}{10 + \dfrac{12 \times 0{,}1}{5}} = 2{,}23 \text{ ampères.}$$

CVII. *Un courant fourni par une pile de* 10 *éléments Daniell passe dans un voltamètre, et dans un appareil à galvanoplastie. Dans le voltamètre, il se dégage* 9 *centimètres cubes de gaz par minute. On demande :*

1° *Quelle sera la masse de cuivre déposée dans la cuve à galvanoplastie, au bout d'une heure;*

2° *Quelle sera, pendant ce temps, la masse de zinc brûlée dans la pile tout entière;*

3° *Quelle est l'intensité du courant, évaluée en ampères;*

4° *Quelle est la résistance totale du circuit, évaluée en ohms.*

Un courant de 1 *ampère électrolyse* $0^{mmg},093$ *d'eau par seconde; la force électromotrice d'un élément Daniell est de* 1 volt, 08. — *La masse spécifique de l'air est* $0^{gr},001293$; *la densité de l'hydrogène est* 0,069. — *Les équivalents électro-chimiques du cuivre et du zinc sont respectivement* 32 *et* 33.

Solution. — 1° Si dans le voltamètre il se dégage 9 centimètres cubes de gaz par minute, le volume d'hydrogène électrolysé pendant ce temps est de 6 centimètres cubes; et sa masse est $6 \times 0{,}001294 \times 0{,}069 = 0^{gr},000535$. En une heure, le courant électrolyse donc une quantité d'hydrogène 60 fois plus grande, c'est-à-dire $0^{gr},0321$. — Or, d'après les lois de Faraday, les masses d'hydrogène et de cuivre électrolysées pendant le même temps et par le même courant, sont entre elles comme les équivalents chimiques 1 et 32. La masse de cuivre déposée au bout d'une heure, dans l'appareil à galvanoplastie, est donc de $32 \times 0{,}0321 = 1^{gr},027$.

2° D'autre part, au dégagement de 1 gramme d'hydrogène, correspond la dissolution de 33 grammes de zinc dans chacun des éléments de pile : la masse de zinc brûlée, en une heure, dans toute la pile, est donc de $10 \times 33 \times 0{,}0321 = 10^{gr},593$.

3° En multipliant par 9 le nombre 0,000535, qui représente la masse d'hydrogène dégagée par le courant pendant une minute, on obtient la quantité d'eau décomposée par le courant pendant le même temps ; et le quotient du produit obtenu par le nombre 60, représente la masse d'eau décomposée en une seconde : ce nombre, exprimé en milligrammes, est $0^{mmgr},08025$. L'intensité du courant, évaluée en ampères, est donc de

$$\frac{0{,}08025}{0{,}093} = 0^{amp},863.$$

4° Pour calculer la résistance totale du circuit, nous remarquerons que l'on a, en

général, $i = \frac{E}{R}$. En désignant par i, E et R l'intensité du courant évaluée en ampères, la force électromotrice de la pile qui le produit, évaluée en volts, et la résistance totale du circuit, évaluée en ohms. Nous connaissons $i = 0^{amp},863$; la force électromotrice de chaque élément Daniell étant de $1^{volt},08$, celle de la pile entière est $10^{volt},8$; on a donc, pour la résistance du circuit,

$$R = \frac{10,8}{0,863} = 12^{ohms},5.$$

CVIII. *Quelle est la résistance d'un fil de cuivre de* 1 *kilomètre de longueur et de* 5 *millimètres de diamètre? On donne le coefficient de résistance* $k = 0,018$; *c'est la résistance d'un fil de cuivre de* 1 *millimètre carré de section, et de* 1 *mètre de longueur.*

Solution. — On a :

$$r = \frac{kl}{s}, \qquad l = 1900^{m}, \qquad s = \frac{\pi \times 5^2}{4} = 19 \text{ mm.q } 635.$$

d'où $r = 0,917$ ohm.

CIX. *Quelle serait la quantité d'énergie dépensée par seconde, pour faire circuler un courant de* 100 *ampères dans un conducteur en cuivre de* 1 *kilomètre de longueur et de* 5 *millimètres de diamètre?*

Solution. — On doit avoir

$$W = i^2 r\theta \text{ joules}, \qquad i = 100, \qquad r = 0,917, \qquad \theta = 1, \qquad W = 9170 \text{ joules}.$$

Comme le kilogrammètre vaut 9,81 joules, la dépense d'énergie est de 934 kilogrammètres par seconde.

CX. *Un courant dont l'intensité est d'un ampère est lancé pendant une seconde dans un fil de platine de* $0^{mm},1$ *de diamètre. Quel est l'accroissement de la température du fil? On supposera qu'il n'y a aucune déperdition de chaleur, ni par la surface, ni par les extrémités du fil. — Densité du platine,* 22; *chaleur spécifique,* 0,03; *résistance spécifique* $k = 0,1$.

Solution. — Soit l la longueur, évaluée en mètres, s la section du fil, en millimètres carrés, et k la résistance spécifique du platine (résistance d'un fil de 1 mètre de longueur, et de 1 millimètre carré de section). La résistance du fil est $r = \frac{kl}{s}$; la quantité d'énergie apportée dans ce fil par un courant d'intensité i ampères, en θ secondes, est

$$r.i^2\theta \text{ joules} \qquad \text{ou} \qquad \frac{kl}{s} i^2\theta \text{ joules}.$$

Soit t l'accroissement de la température, et c la chaleur spécifique du platine; le volume du fil de platine, en centimètres cubes, est exprimé par le produit de la longueur 100 l (évaluée en centimètres carrés) par la section $\frac{s}{100}$ (évaluée en centimètres carrés), c'est-à-dire par sl; la masse du fil est donc $sl \times 22$ grammes; le nombre de petites calories dégagées pendant θ secondes est $sl \times 22 \times ct$; et l'énergie équivalente est de $sl.22.ct \times 4,17$ joules. On doit avoir

$$\frac{kl}{s} i^2\theta = sl \times 22. \times c.t \times 4,17.$$

On voit que le résultat est indépendant de la longueur l,

$$t = \frac{ki^2\theta}{s^2 \times 22 \times c \times 4,17}.$$

Dans les conditions spécifiées, on a :

$$k = 0,1 \qquad c = 0,03, \qquad i = 1, \qquad \theta = 1, \qquad s = \frac{\pi}{4} \times 0,01 = 0^{mmq},007854;$$

il vient alors

$$t = 588^{0}.$$

CXI. *On sait qu'une lampe à incandescence, équivalente à* 1 *carcel, a une résistance de* 70 *ohms, quand elle est allumée, et qu'elle exige un courant de* 0,65 *ampère. — Le courant produit par une pile, se divise en* 10 *courants qui passent chacun dans une de ces lampes, puis les* 10 *courants se réunissent pour revenir à la pile. Sachant que, pour chaque élément de pile, la résistance est* $\rho = 0{,}25$ *ohm, et la force électromotrice est* $e = 1{,}9$ *volt, on demande combien la pile doit comprendre d'éléments associés en série.*

Solution. — La résistance du groupe des 10 lampes est 10 fois moindre que celle d'une seule ; on a donc, pour la résistance extérieure à la pile, $R = 7$ ohms. Le courant, dans chaque lampe, devant avoir une intensité de 0,65 ampères, il a, dans la pile, une intensité dix fois plus grande, $i = 6{,}5$ ampères. Soit n le nombre des éléments de pile ; la résistance de la pile est $n\rho$, et la force électromotrice est ne. On a donc :

$$\frac{ne}{n\rho + R} = i,$$

d'où l'on tire la valeur de n,

$$n = \frac{Ri}{e - \rho i} = 159.$$

CXII *Une bobine mobile, de section* S, *porte* N *tours de fil ; son axe est perpendiculaire aux lignes de force d'un champ magnétique uniforme d'intensité* F. *On y fait passer un courant d'intensité* i ; *et l'on voit l'axe se placer dans la direction des lignes de force. Évaluer en ergs le travail effectué par les forces électromagnétiques*

Solution. — Faisons usage des unités absolues électromagnétiques. Dès que le courant passe, la bobine constitue un aimant, de moment magnétique $M = Nsi$ (840). — Le moment du couple qui sollicite la bobine à se déplacer est $MF = NsiF$. C'est aussi le travail effectué par les forces du couple, pendant la rotation de 90° qu'effectue la bobine. (Probl. CIII.)

CXIII. *Une bobine, de section* S, *portant* N *tours de fil, est mobile autour d'un axe de rotation vertical, dans un champ uniforme, d'intensité magnétique* F, *dont les lignes de force sont horizontales. Un galvanomètre est intercalé dans le circuit de la bobine, et* R *est la résistance totale du circuit fermé. L'axe de figure de la bobine étant d'abord perpendiculaire aux lignes de force, on fait tourner de* 90°. *Évaluer la quantité d'électricité* q *mise en mouvement dans le courant induit.*

Solution. — Employons les unités absolues électromagnétiques. Soit i l'intensité moyenne du courant induit, et θ sa durée. La bobine équivaut, pendant le mouvement, à un aimant de moment magnétique $M = Nsi$; le travail des forces électromagnétiques est MF ; il est résistant, d'après la loi de Lenz. On a donc dépensé une énergie mécanique de $NsiF$ pour produire ce mouvement. — Cette énergie est transformée par le courant en énergie calorifique, disséminée en tous les points du circuit ; or la grandeur de celle-ci est donnée par la formule de Joule : $i^2R\theta$. On a donc

$$NsiF = i^2R\theta; \qquad \text{d'où} \qquad i\theta = \frac{NsF}{R}.$$

Or $i\theta = q$ est la quantité d'électricité mise en mouvement

$$q = \frac{NsF}{R}.$$

La déviation du galvanomètre, pour un courant induit instantané est proportionnelle à i et à θ ; c'est-à-dire à q. Cette déviation fournit donc une mesure de q.

Remarque. — La même quantité d'électricité est induite en sens contraire, dans le même circuit fermé, lorsqu'on fait tourner la bobine de manière que l'axe de figure d'abord parallèle aux lignes de force, devienne perpendiculaire à ces lignes.

Enfin, on arriverait au même résultat si, laissant la bobine immobile, son axe de figure étant parallèle aux lignes de force, on supprimait brusquement le champ magnétique.

CXIV. *On a enroulé, sur une bobine cylindrique, un fil primaire dont les extrémités peuvent être mises en communication avec les deux pôles d'une pile, et un fil secondaire, dont les extrémités communiquent avec les deux bornes d'un galvanomètre. Dans une première expérience, l'intérieur de la bobine étant occupé par de l'air, on fait passer le courant primaire ; soit* i *son intensité. Ce courant étant brusquement interrompu, il se produit dans le circuit secondaire un courant induit, qui imprime à l'aiguille du galvanomètre une déviation* α.

On recommence l'expérience, en plaçant dans l'intérieur de la bobine un noyau de fer, ou de toute autre substance magnétique. Le courant primaire ayant la même intensité i, *on l'interrompt, et il se produit dans le circuit secondaire, un courant induit, qui imprime à l'aiguille du galvanomètre une déviation* β. *Déduire, de* α *et de* β, *les coefficients d'aimantation de la substance magnétique.*

Solution. — En employant les mêmes notations que dans la question précédente, la quantité d'électricité induite, dans la première expérience, est $q = \frac{NsF}{R}$; la déviation α, proportionnelle à q, est donc proportionnelle à la *force magnétisante* F, due au courant primaire.

Dans la seconde expérience, F′ étant la force magnétique à l'intérieur du noyau de fer, sous l'influence du même courant primaire, la déviation β est proportionnelle à la quantité d'électricité induite $q' = \frac{NsF'}{R}$. On a donc :

$$\frac{\beta}{\alpha} = \frac{F'}{F} = \mu.$$

Le rapport $\frac{\beta}{\alpha}$ fait donc connaître le coefficient de perméabilité magnétique (849) de la substance placée à l'intérieur de la bobine. — La formule connue $\mu = 1 + 4\pi k$, permettra de calculer le coefficient de susceptibilité magnétique (849),

$$k = \frac{\mu - 1}{4\pi} = \frac{\frac{\beta}{\alpha} - 1}{4\pi}.$$

TABLE DES MATIÈRES

NOTIONS PRÉLIMINAIRES

I. — **Notions de mécanique.**

MOUVEMENTS. — FORCES. 1

Mouvement uniforme, 1. — Mouvement varié, vitesse, 2. — Mouvement uniformément varié, 3. — Principe de l'inertie, 4. — Forces, dynamomètres, 4. — Mouvements produits par des forces constantes; masse, 6.

COMPOSITION DES FORCES. 8

Forces appliquées en un point, 9. — Forces parallèles, 9. — Couples, 11.

TRAVAIL. — FORCE VIVE 12

Travail moteur, travail résistant, 13. — Principe des forces vives, 14. — Transmission du travail dans les machines, 15.

II. — **Constitution des corps. — Énergie.**

Atomes, molécules, 16. — États physiques des corps, 17. — Énergie, conservation de l'énergie, 20.

III. — **Système d'unités C. G. S.**

Unités fondamentales C.G.S. et unités dérivées, 23. — Unités pratiques, 24.

IV. — **Instruments de mesure.**

Vernier, 25. — Cathétomètre, 26.

LIVRE PREMIER

PESANTEUR ET HYDROSTATIQUE

CHAP. I. — **Pesanteur.**

I. — PESANTEUR. — CENTRE DE GRAVITÉ. 29

Direction de la pesanteur, 29. — Poids, centre de gravité, 30. — Divers cas d'équilibre, 32.

II. — CHUTE DES CORPS. 34

Chute des corps dans le vide, 34 — Machine d'Atwood, 35. — Appareil du général Morin, 40.

III. — Pendule. 43

Mouvement du pendule simple, 45. — Lois du pendule. 45. — Intensité de la pesanteur, 46. — Application du pendule aux horloges, 47.

IV. — Balance. 48

Mesure des poids et des masses, 48. — Balance, 48. — Conditions de justesse, 50. — Conditions de sensibilité, 52. — Double pesée, 54. — Balances de précision, 54.

Chap. II. — **Hydrostatique des liquides.**

I. — Équilibre des liquides. — Principes fondamentaux. 57

Transmission des pressions, 58. — Égalité de pression en tous sens, 59. — Équilibre d'un liquide pesant, 60. — Surfaces de niveau, 62. — Vases communicants, 62. — Liquides superposés, 63. — Applications. 64.

II. — Pressions sur les parois des vases. 66

Pression sur le fond horizontal, 66. — Pressions sur les parois latérales, 68. — Pression sur l'ensemble de la paroi. 69. — Tourniquet hydraulique. 70.

III. — Principe d'Archimède. 71

Poids apparent, 72. — Équilibre des corps flottants, 73.

IV. — Capillarité. 74

Lois des ascensions et des dépressions capillaires, 75.

Chap. III. — **Densités. — Aréomètres.**

I. — Densités. — Poids spécifiques. 77

Définitions, 77.

II. — Détermination des densités des corps solides et liquides. 78

Méthode du flacon, 78. — Méthode de la balance hydrostatique, 80. — Méthode de l'aréomètre de Nicholson, 80. — Corps solides solubles dans l'eau, 81. — Tables de densités. 83.

III. — Aréomètres a poids constant. 83

Aréomètres de Baumé, 83. — Alcoomètre centésimal, 85.

Chap. IV. — **Pesanteur de l'air et des gaz. — Baromètre.**

Transmission des pressions dans les gaz, 86. — Expériences de Torricelli, de Pascal, 87. — Mesure de la pression atmosphérique, 89. — Effets de la pression atmosphérique, 90. — Baromètres à cuvette, 92. — Corrections barométriques, 96. — Baromètres à siphon. 97. — Baromètres métalliques, 99. — Mesure des hauteurs par le baromètre, 100.

Chap. V. — **Force élastique des gaz.**

I. — Loi de Mariotte. 101

Expériences de Mariotte, 101. — Expériences de Dulong et Arago, 104. — Expériences de Regnault, 106. — Compressibilité des gaz sous de fortes pressions, 108.

II. — Mesure de la force élastique des gaz. — Manomètres. 110

Manomètres industriels, 110. — Manomètres de Regnault, 113.

III. — Mélange des gaz. 114

Diffusion des gaz, 114. — Loi du mélange des gaz, 115.

IV. — Mélange des liquides et des gaz. 116

Lois de Dalton. 117. — Actions des solutions salines sur les gaz, 119.

V. — Extension du principe d'Archimède aux gaz. — Aérostats. 120

Baroscope. 120. — Corrections des pesées effectuées dans l'air, 121. — Aérostats force ascensionnelle, 122.

Chap. VI. — **Pompes à gaz et à liquides. — Siphon.**

I. — Machines servant a raréfier ou a comprimer les gaz. 126

Machine pneumatique, 126. — Machine pneumatique à mercure, 132. — Pompe à main, 134. — Applications de la raréfaction ou de la compression, 136.

II. — Pompes a liquides. 137

Pompe aspirante, 137. — Pompe foulante, 139. — Pompe aspirante et foulante, 141. — Pompe aspirante et élévatoire, 142. — Presse hydraulique, 142.

III. — Siphon. — Vase de Mariotte. 144

LIVRE II

CHALEUR

Chap. I. — **Dilatations.**

I. — Dilatation des corps par la chaleur. 149

II. — Thermomètres. 151

Températures, 151. — Construction et graduation du thermomètre à mercure, 152. — Echelles thermométriques, 155. — Déplacement du zéro, 155. — Thermomètre à alcool, 156. — Choix de la substance thermométrique, thermomètre normal, 157. — Définition précise du degré de température, 158.

Chap. II. — **Mesure des dilatations.**

I. — Dilatations des corps solides. 160

Dilatation linéaire; formules, 160. — Méthode de Lavoisier et de Laplace, 161. — Coefficients de dilatation linéaire, 163 — Dilatation cubique; formules, 165. — Dilatation des enveloppes, 165.

II. — Dilatations des liquides. 166

Dilatation absolue du mercure, méthode de Dulong et Petit, 166. — Dilatation absolue des autres liquides, 168. — Procédé du thermomètre à poids, 169. — Procédé du thermomètre à tige, 170. — Maximum de densité de l'eau. 172. — Thermomètre à poids, appliqué à l'étude de la dilatation des solides, 174.

III. — Dilatations des gaz. 174

Loi de Gay-Lussac; formules, 174. — Expériences de Gay-Lussac, 176. — Expériences de Regnault, 178. — Coefficients de dilatation des gaz, sous pression constante, 180.

Chap. III. — **Densités des gaz.**

Définitions, 182. — Méthode de Regnault, 183. — Poids spécifique de l'air, 185. — Table des densité des gaz, 188.

Chap. IV. — **Applications des dilatations.**

I. — Applications des dilatations des solides. 189

Corrections des mesures linéaires, 189. — Pendules compensateurs, 189. — Thermomètre de Bréguet. 191.

II. — Applications des dilatations des liquides. 192

Réduction des hauteurs barométriques à zéro, 192. — Thermomètre à poids, 192.

III. — Applications des dilatations des gaz. — Thermomètres a gaz. . . . 193

Thermomètre à air, de Regnault, 193. — Thermomètre de Dulong et Petit, 194.

IV. — Corrections aux densités. 196

Chap. V. — **Changements d'état des corps.**

Passage de l'état solide a l'état liquide, et passage inverse de l'état liquide a l'état solide. 198

Fusion, 198. — Points de fusion, 199. — Chaleur de fusion, 199. — Solidification; surfusion, 200. — Changements de volume, accompagnant la fusion ou la solidification, 202. — Influence de la pression sur la température de fusion, 202. — Regel, 203. — Mélanges réfrigérants, 204. — Cristallisation, sursaturation, 206.

Chap. VI. — **Propriétés des vapeurs.**

I. — Mesure de la force élastique des vapeurs formées dans le vide. . . 208

Tension maximum des vapeurs, 208. — Maximum de tension de la vapeur d'eau aux différentes températures, 210. — Tables de tension des vapeurs, 214.

II. — Mélange des gaz et des vapeurs. 215

Loi du mélange des gaz et des vapeurs, 216.

III. — Densités des vapeurs. 217

Procédé de Dumas, 217. — Applications, 219.

Chap. VII. — **Formation des vapeurs. — Condensation des vapeurs et des gaz.**

I. — Évaporation. 221

Froid produit par l'évaporation, 221. — Applications, appareils Carré, 223. — Production des basses températures, 224.

II. — Ébullition. 224

Lois de l'ébullition, 225. — Marmite de Papin, 227. — Vaporisation totale, 228. — Expériences de M. Donny, de M. Dufour, de M. Gernez, 229. — Ebullition des solutions salines, 232. — Point normal d'ébullition, 232. — Chaleur de vaporisation, 233.

III. — Caléfaction. 233

IV. — Liquéfaction des vapeurs et des gaz. 236

Liquéfaction des vapeurs, distillation, 236. — Liquéfaction des gaz, 237. — Température critique; expériences de M. Cailletet, 238.

Chap. VIII. — **Hygrométrie.**

État hygrométrique, 243. — Hygromètre chimique, 244. — Hygromètre à cheveu, 246. — Hygromètres de condensation, 248. — Psychromètre, 250.

Chap. IX. — **Calorimétrie.**

Objet de la calorimétrie. Unité de chaleur : calorie, 252.

I. — Mesure des chaleurs spécifiques. 253

Méthode de la fusion de la glace; calorimètre de Bunsen, 254. — Méthode des mélanges; appareils de Regnault, de M. Berthelot, 256. — Chaleurs spécifiques des corps solides et liquides, 259. — Chaleurs spécifiques des gaz, sous pression constante, 260. — Chaleurs spécifiques des gaz à volume constant ; rapport des deux chaleurs spécifiques, 261. — Expérience de Clément et Desormes, 262. — Lois de Dulong et Petit, de Woestyn, de Delaroche et Bérard, 264.

II. — Mesure des chaleurs de fusion et de vaporisation. 265

Chaleurs de fusion, 265. — Chaleurs de vaporisation, 267.

III. — Mesure des chaleurs de combinaison. 269

Calorimètres de Favre et Silbermann, 270. — Chaleurs de combustion, 271.

Chap. X. — **Chauffage et machines à vapeur.**

I. — Divers modes de chauffage. 275

II. — Chaudières a vapeur. 275

Chaudières à bouilleurs, 275. — Alimentation des chaudières ; injecteur Giffard, 277. — Chaudières tubulaires, 280.

III. — Machines a vapeur. 280

Condenseur, 281. — Détente, 282. — Distribution de la vapeur, tiroir, 282. — Puissance d'une machine ; cheval-vapeur ; watt, 284. — Organes régulateurs du mouvement, 284. — Divers types de machines, 287. — Locomotives, 289. — Machines à gaz, 289.

Chap. XI. — **Notions sur la théorie méeanique de la chaleur.**

I. — Équivalence entre le travail mécanique et la chaleur. 291

Apparition de chaleur, accompagnant la disparition d'une force vive, 291. — Notion de l'équivalence, 292. — Expériences de Joule, 295. — Expériences de Hirn, 295.

II. — Interprétation mécanique des effets produits par la chaleur. 297

La chaleur envisagée comme un mode de mouvement, 297. — Effets d'une addition de chaleur sur un gaz assujetti à conserver un volume constant, 298. — Gaz soumis à une pression constante, 299. — Détermination de l'équivalent mécanique de la chaleur par les propriétés des gaz, 300. — Effets d'une addition de chaleur sur les corps solides ou liquides, 301. — Chaleur de fusion ; chaleur de vaporisation, 302.

III. — Transformations de l'énergie 303

Transformations de l'énergie dans les phénomènes physiques, 303. — Principe de Carnot, 304. — Rendement des machines thermiques, 305. — Transformations de l'énergie dans les phénomènes chimiques, principe du travail maximum, 306. — Origine de la chaleur et du mouvement chez les animaux, 308. — Absorption de la chaleur solaire pour le développement des végétaux, 309.

LIVRE III

ACOUSTIQUE

Chap. I. — **Prodnction et propagation dn son.**

I. — Production du son. 311

Mouvement vibratoire, 311. — Caractères distinctifs des sons, 312. — Bruits, 313.

II. — Propagation du son. 314

Ondes sonores, 314. — Le son ne se propage pas dans le vide, 315. — Propagation par les liquides et les solides, 315.

III. — Vitesse de propagation du son. 316

Vitesse dans l'air, 317. — Vitesse dans divers milieux, 318. — Longueur d'onde, 319.

IV. — Réflexion du son. 325

Échos, 324. — Résonance, 325.

Chap. II. — **Hauteur des sons. — Intervalles musicaux.**

I. — Appareils destinés a compter les vibrations. 326

Sirène, 326. — Roues dentées, 328. — Compteurs graphiques, 329.

II. — Intervalles musicaux. — Gamme. 331

Gamme, accord parfait, 331. — Dièses et bémols, 333. — Gamme tempérée, 334. — Diapason normal, 336.

Chap. III. — **Vibrations des gaz. — Tuyaux sonores.**

Tuyaux sonores, 336. — Loi des longueurs, 337. — Nœuds et ventres fixes de vibration, 338. — Lois des harmoniques des tuyaux, 342. — Détermination de la vitesse du son dans les gaz et dans les liquides, 344. — uyaux à anche, 344. — Instruments à vent, 345.

Chap. IV. — **Vibrations des corps solides.**

I. — Vibrations des cordes. 348

Lois des vibrations transversales, 348. — Harmoniques des cordes, 350. — Instruments à cordes, 351. — Vibrations longitudinales, 352.

II. — Vibrations des verges, des plaques, etc. 353

Vibrations transversales des verges, 353. — Vibrations longitudinales, 353. — Vibrations des plaques, des timbres, des cloches, des membranes, 354.

Chap. V. — **Timbres des sons.**

Sons composés, causes générales du timbre, 357. — Renforcement des sons, 358. — Analyse des sons, 360. — Phonographe, 362.

LIVRE IV

OPTIQUE

Chap. I. — **Propagation de la lumière. — Photométrie.**

I. — Propagation de la lumière. 365

Hypothèse de l'émission et hypothèse des ondulations, 365. — Propagation rectiligne; ombre, pénombre, 366. — Images dans la chambre obscure, 368.

II. — Photométrie. 370

Intensités propres des sources, 370. — Photomètres de Foucault, de Rumford, 371. — Unité d'intensité lumineuse, 372.

Chap. II. — **Réflexion de la lumière.**

I. — Réflexion par les surfaces planes. 375

Lois de la réflexion régulière, 375. — Images produites par les miroirs plans, 376. — Réflexion à la surface des corps transparents, 378. — Diffusion, 379. — Miroirs parallèles, miroirs inclinés, 380.

II. — Miroirs sphériques. 383

Miroirs concaves, 383. — Distances conjuguées, 387. — Plans conjugués, 389. — Construction géométrique de l'image, 390. — Détermination analytique, 392. —

Images aériennes, 395. — Miroirs convexes, 396. — Détermination de la distance focale d'un miroir sphérique, 398.

CHAP. III. — **Réfraction de la lumière.**

I. — PRINCIPES GÉNÉRAUX. 400

Lois de la réfraction, 400. — Construction d'Huyghens, 402. — Réfraction par une lame à faces parallèles, 405. — Angle limite, réflexion totale, 405. — Réfractions atmosphériques, 409.

II. — RÉFRACTION AU TRAVERS DES PRISMES. 409

Déviation produite par un prisme, 410. — Minimum de déviation, 413. — Détermination des indices de réfraction, 413.

III. — LENTILLES SPHÉRIQUES. 415

Lentilles convergentes, 415. — Centre optique, axes secondaires, 419. — Plans conjugués; distances conjuguées, 421. — Construction géométrique de l'image, 422. — Détermination analytique, 424 — Lentilles divergentes, 427.

CHAP. IV. — **Dispersion.**

I. — DÉCOMPOSITION ET RECOMPOSITION DE LA LUMIÈRE. 429

Spectre solaire, 429. — Recomposition de la lumière blanche, 431. — Achromatisme des lentilles, 433. — Couleurs complémentaires; couleurs des corps, 435. — Propriétés calorifiques, chimiques et phosphorogéniques du spectre, 436. — Les couleurs diffèrent par la rapidité du mouvement vibratoire, 437.

II. — ÉTUDE DES SPECTRES DE DIVERSES ORIGINES. — ANALYSE SPECTRALE. . . 438

Raies du spectre solaire, 438. — Spectroscope, 439. — Spectres des lumières artificielles. 440. — Analyse spectrale, 441. — Renversement des raies, 442. — Explication de la production des raies du spectre solaire, 445.

CHAP. V. — **Vision. — Instruments d'optique. — Vitesse de la lumière.**

I. — VISION. 445

Structure de l'œil, 445. — Formation des images, 446. — Vision à différentes distances; distance minimum de la vision distincte, 447. — Principales espèces de vues; besicles, 448. — Estimation de la distance et de la grandeur d'un objet 450. — Appréciation du relief; stéréoscope, 452.

II. — INSTRUMENTS D'OPTIQUE. 455

Microscope solaire, 455. — Loupe, 454. — Puissance, 456. — Grossissement, pour une vue déterminée, 458. — Microscope composé, 458. — Puissance; mesure expérimentale, 460. — Grossissement, pour une vue déterminée, 462. — Champ du microscope; point oculaire, 462. — Lunette astronomique, 463. — Grossissement; mesure expérimentale, 464. — Réticule; axe optique, 466. — Oculaires composés, 467. — Lunette terrestre, 468. — Lunette de Galilée, 469. — Télescope de Newton, 471. — Télescope de Foucault, 472. — Télescope de Grégory, 473. — Phares; lentilles à échelons, 474.

III. — DÉTERMINATION DE LA VITESSE DE LA LUMIÈRE. 475

Déterminations anciennes, 475. — Méthode de M. Fizeau, 476. — Résultats, 478.

CHAP. VI. — **Notions sommaires sur la photographie.**

Production des images dans la chambre noire, 479. — Daguerréotypie, 480. — Production des clichés, 481. — Epreuves positives aux sels d'argent, 482. — Epreuves au charbon, 482. — Photoglyptie; photogravure, 483.

ADDITION AU LIVRE IV

PROPAGATION DE LA CHALEUR

Chap. I. — **Chaleur rayonnante.**

I. — Propagation de la chaleur par rayonnement. 485

Rayonnement, 485. — Intensités calorifiques d'une même source à différentes distances, 486. — Appareil de Melloni, 486.

II. — Émission. 488

Pouvoirs émissifs des corps, 489. — Refroidissement; loi de Newton, 489.

III. — Réflexion, transmission et absorption. 490

Lois de la réflexion, 490. — Pouvoirs réflecteurs, 492. — Diffusion, 492. — Transmission, 492. — Décomposition de la chaleur par le prisme; radiations lumineuses et obscures, 493. — Pouvoirs diathermanes, 494. — Pouvoirs absorbants, 495. — Égalité des pouvoirs émissifs et des pouvoirs absorbants, 496. — Equilibre mobile de température, 497. — Réflexion apparente du froid, 497. — Identité de la chaleur et de la lumière, 498.

Chap. II. — **Conductibilité.**

Conductibilité des solides, 499. — Coefficients de conductibilité, 500. — Courants produits dans les liquides ou dans les gaz, convection, 501. — Conductibilité des liquides, 502. — Conductibilité des gaz, 502. — Applications, lampes de sûreté, 503.

LIVRE V

ÉLECTRICITÉ ET MAGNÉTISME

Chap. I. — **Électricité statique.**

I. — Phénomènes fondamentaux. 505

Electrisation par frottement, 505. — Corps conducteurs, corps isolants, 505. — Les deux électricités, 506. — Influence électrique, 508. — Etincelle électrique, 510. — Mouvements des corps légers, 510. — Théorème de Faraday, 512.

II. — Lois des actions électriques. — Masses électriques. — Champ électrique. 514

Loi de Coulomb, 514. — Masses électriques, unité électrostatique C. G. S., 515. — Unité pratique : coulomb, 516. — Champ électrique, lignes de force, 516. — Flux de force, théorème de Gauss, 518. — Théorème de Newton, 520.

III. — Distribution de l'électricité. — Déperdition. 521

Distribution à la surface des conducteurs; densité électrique, 522. — Théorème de Coulomb, 523. — Tension électrostatique, 524. — Pouvoir des pointes, 525. — Déperdition. 526.

IV. — Potentiel électrique. 527

Niveau électrique, ou température électrique, 527. — Définition du potentiel par le travail électrique, 528. — Potentiel d'un conducteur en équilibre, 529. — Surfaces de niveau, 529. — Expression du potentiel en un point d'un champ élec-

trique, 531. — Capacité électrique d'un conducteur, dans des conditions déterminées, 533. — Unités électrostatiques C. G. S. de potentiel et de capacité, 534. — Unités pratiques : volt; farad, microfarad. 535. — Partage des charges entre deux conducteurs de capacités déterminées, 535. — Mesure expérimentale des potentiels, 536. — Mesure des capacités, 537. — Interprétation des phénomènes d'influence, 537.

V. — Électroscopes. — Électromètres. 539

Électroscope à feuilles d'or, 540. — Mesure des charges électriques, 541. — Électromètre à quadrants, mesure des potentiels, 542.

VI. — Machines électriques. 543

Sources électriques, 543. — Machine de Ramsden, 544. — Électrophore, 547. — Machine de Holtz, 549. — Machine de Carré, 552. — Machine de Wimshurst, 553.

VII. — Condensation de l'électricité. — Appareils condensateurs. 556

Force condensante, 557. — Condensateur sphérique à lame d'air, 557. — Bouteille de Leyde; batteries, 558. — Décharge successive, 560. — Décharge instantanée, 561. — Charges résiduelles, 562. — Pouvoir inducteur spécifique d'un diélectrique, 564. — Condensateurs-étalons pour la mesure des capacités, 565. — Electroscope condensateur de Volta, 566.

VIII. — Énergie électrique. — Effets des décharges. 567

Énergie potentielle d'un corps électrisé, 567. — Effets mécaniques, 569. — Effets calorifiques, 570. — Effets lumineux, 571. — Effets chimiques, 574. — Effets physiologiques, 575.

Chap. II. — **Magnétisme.**

I. — Phénomènes généraux du magnétisme. 577

Pôles des aimants, 577. — Spectre magnétique, 578. — Action de la Terre sur un aimant; distinction des deux pôles, 578. — Actions réciproques des pôles de deux aimants, 579. — Aimantation temporaire du fer, 581. — Aimantation permanente de l'acier, 582. — Constitution des aimants, 582. — Distribution du magnétisme libre; définition précise des pôles, 584. — Loi des attractions et des répulsions magnétiques, 585. — Masses magnétiques; unité de masse magnétique C. G. S., 586. — Moment magnétique d'un aimant; intensité d'aimantation, 587. — Champ magnétique; lignes de force, 588.

II. — Magnétisme terrestre. 589

Champ magnétique terrestre, 589. — Déclinaison et inclinaison, 590. — Boussole de déclinaison, 592. — Boussole d'inclinaison, 594. — Composante horizontale de la force magnétique terrestre, en un point du globe, 595. — Boussoles, 596.

III. — Procédés d'aimantation. — Conservation du magnétisme dans les aimants. 597

Procédé de la simple touche, 597. — Touche séparée, 597. — Double touche, 598. — Aimantation à saturation, 598. — Aimantation par l'action de la Terre, 599. — Conservation des aimants, armures et contacts, 599. — Aimants de Jamin, 601.

Chap. III. — **Électricité dynamique.**

I. — Phénomènes généraux. 602

Expérience de Galvani, 602. — Théorie et expériences de Volta, 603.

II. — Piles a un seul liquide 606

Piles hydro-électriques; différence de potentiel aux deux pôles d'une pile en circuit ouvert, 606. — Courant électrique, 608. — Force électromotrice d'une pile, 609. — Pile de Volta, 610. — Modifications apportées à la pile de Volta, 611. — Emploi du zinc amalgamé, 613. — Décomposition de l'eau par un courant; théorie de Grothus, 614. — Causes des variations des piles à un liquide, 616. — Pile au bichromate, 616.

III. — Piles a deux liquides séparés. 617

Pile de Daniell, 617. — Pile de Bunsen, 619. — Pile de Leclanché, 620.

IV. — Piles thermo-électriques. 621

Courants thermo-électriques, 621. — Piles thermo-électriques, 622.

V. — Effets chimiques des courants. 624

Décomposition des composés chimiques; théorie de Grothus, 624. — Décomposition des composés binaires, 625. — Décomposition des sels oxygénés, 625. — Lois de Faraday, 626. — Effets secondaires; décomposition des sels alcalins, 628. — Electrode soluble, 628. — Polarisation, 629. — Accumulateurs, 630.

VI. — Galvanoplastie. 631

Galvanoplastie, 631. — Dorure, argenture, cuivrage, etc., 634.

VII. — Effets caloriques, lumineux et physiologiques. 635

Effets calorifiques, 635. — Effets lumineux; arc voltaïque, 635. — Effets physiologiques, 637.

Chap. IV. — **Lois des courants.**

I. — Intensités des courants. — Lois d'Ohm et de Joule. 638

Intensités des courants; unité pratique d'intensité : ampère, 638. — Mesure des intensités par le voltamètre, 638. — Expérience d'Œrstedt, règle d'Ampère, 639. — Mesure des intensités par les galvanomètres, 640. — Résistance d'un conducteur, 641. — Unité pratique de résistance : ohm, 642. — Étalons, boites de résistances, 643. — Coefficients de résistance des solides, des liquides, 644. — Résistance totale d'un circuit, 646. — Lois d'Ohm, 646. — Loi de Joule, 647.

II. — Divers modes d'association des éléments de pile. — Courants dérivés. 649

Association des éléments en série, 649. — Association en batterie, 650. — Association en plusieurs séries, réunies en batterie, 651. — Courants dérivés, 652. — Pont de Wheatstone, 653.

III. — Mesure des résistances des conducteurs. — Constantes des piles . 654

Méthode du pont de Wheatstone, 654. — Constantes d'une pile, 655.

IV. — Choix des unités électriques. 657

Unités absolues électrostatiques C.G.S., rejetées par le Congrès des électriciens, 657. — Unités absolues électromagnétiques C.G.S, adoptées par le Congrès, 657. — Unités pratiques, 658.

Chap. V. — **Électromagnétisme.**

I. — Champs magnétiques produits par les courants. 659

Loi de Biot et Savart, 659. — Loi élémentaire de Laplace, 659. — Champ magnétique, à l'intérieur d'un courant fermé, plan et convexe, 660. — Champ magnétique d'un courant circulaire, 661. — Champ magnétique d'une bobine, 662.

II. — Galvanomètres. 662

Principe des galvanomètres, 662. — Galvanomètre de Nobili, 665. — Galvanomètre de Bourbouze, 666. — Galvanomètre de W. Thomson, 668. — Shunt des galvanomètres, 669. — Galvanomètres apériodiques, 670. — Ampèremètres, voltmètres, 671.

III. — Actions des courants sur les aimants et actions réciproques. 672

Exemples de mouvements divers, imprimés à des aimants par des courants, 672. — Action d'un champ magnétique sur un élément de courant mobile, 675. — Exemples de mouvements divers, imprimés à des courants par des aimants, 676.

Chap. VI. — **Électrodynamique.**

I. — Actions des courants sur les courants. 680

Principe des courants parallèles, 680. — Principe des courants angulaires. 681. — Principe des courants sinueux, 683. — Conducteurs astatiques, 685. — Phénomènes électrodynamiques en général, 685.

II. — Solénoïdes. — Théorie du magnétisme, d'Ampère. 685

Les solénoïdes jouissent de toutes les propriétés des aimants, 685. — Moment magnétique d'un solénoïde, intensité d'aimantation, 686. — Théorie du magnétisme, d'Ampère, 687. — Courant équatorial terrestre, 688.

III. — Électrodynamomètres. 689

Principe des électrodynamomètres, 689. — Électrodynamomètre absolu de M. Pellat, 690.

Chap. VII. — **Aimantation par les courants. — Télégraphie électrique.**

I. — Développement du magnétisme par les courants. — Électro-aimants. . 691

Aimantation permanente de l'acier par les courants et les décharges électriques, 691. — Électro-aimants, 692. — Coefficients d'aimantation des substances magnétiques, 694. — Corps magnétiques et diamagnétiques, 695.

II. — Applications des électro-aimants. — Télégraphie électrique 696

Sonneries électriques, 696. — Parties essentielles d'un télégraphe électrique, 697. — Télégraphe de Morse, 698. — Télégraphe à cadran, 701. — Télégraphes imprimants, 704. — Paratonnerre pour les appareils télégraphiques, 704. — Télégraphie sous-marine, 705. — Siphon-recorder, 706.

Chap. VIII. — **Courants d'induction.**

I. — Phénomènes généraux. 708

Induction volta-électrique, 708. — Induction magnéto-électrique, 710. — Induction telluro-électrique, 712. — Self-induction, 713. — Loi de Lenz, 714. — Force électromotrice d'induction, 716. — Effets de la self-induction sur l'intensité du courant d'une pile, au moment de la fermeture ou de la rupture du circuit, 717. — Comparaison des courants induits de fermeture et de rupture, 718. — — Effets de la self-induction dans la décharge d'une bouteille de Leyde, 719.

II. — Bobines d'induction. 720

Bobine de Ruhmkorff, 720. — Effluve électrique, 724. — Tubes de Geissler, tubes de Crookes. 725. — Production de courants alternatifs de grande fréquence et de grande force électromotrice, 726.

III. — Téléphone et microphone. 728

Téléphone de Bell, 728. — Microphone de Hughes, 729. — Système Ader, 729.

IV. — Machines magnéto-électriques et dynamo-électriques. 731

Disque de Faraday, 731. — Machine magnéto-électrique de Gramme, à courants continus, 732. — Machine magnéto-électrique de Clarke, à courants alternatifs, 735. — Machine dynamo-électrique de Gramme, à courants continus, 737. — Machine dynamo-électrique de Gramme, à courants alternatifs, 739. — Appareils divers, 740.

V. — Éclairage électrique. 741

Lampes à arc, 741. — Régulateur de Foucault, 742. — Régulateurs fonctionnant sans mécanisme, 745. — Bougie Jablochkoff, 744. — Lampes à incandescence, système Edison, 745.

VI. — Transport du travail par les courants électriques. 746

Réversibilité des machines d'induction, transport de travail, 746. — Coefficient de rendement, 747. — Transmission de l'énergie électrique à grande distance, par les courants alternatifs : transformateurs, 750. — Emploi de trois fils de ligne : courants triphasés, 751.

LIVRE VI

MÉTÉOROLOGIE

I. — Répartition de la température a la surface de la Terre. 753

Observations thermométriques, 753. — Variations de la température pendant le jour et pendant l'année, 755. — Saisons météorologiques, 756. — Distribution des températures à la surface du globe, 757. — Climats, 758.

II. — Des vents. 763

Causes principales des vents, 763. — Vents périodiques, 764. — Vents constants, alizés, 765. — Vitesse des vents, 766. — Trombes, cyclones, lois des tempêtes 767. — Service météorologique, 768. — Dépressions, 769.

III. — Observations barométriques. 771

Variations barométriques, 771. — Moyenne barométrique d'un lieu, 772.

IV. — Météores aqueux. 773

Rosée, 773. — Gelée blanche, 774. — Givre, 775. — Brouillards, nuages, 775. — Pluie, 778. — Neige, grêle, grésil, 778. — Verglas, 780.

V. — Électricité atmosphérique. 780

Mesure du potentiel en un point de l'air, 780. — Identité entre les phénomènes de la foudre et ceux de l'électricité, 783. — Nuages positifs et négatifs, 784. — Foudre, éclairs, tonnerre, 784. — Paratonnerres, 787.

VI. — Variations du magnétisme terrestre. 790

Variations de la déclinaison et de l'inclinaison en un même lieu, 790. — Variations à la surface du globe, 791.

VII. — Météores lumineux. 793

Arc-en-ciel, 793. — Halos, 795. — Cercles parhéliques, parhélies, 796. — Couronnes, 796.

PROBLÈMES

Problèmes sur la pesanteur et l'hydrostatique. 797
Problèmes sur la chaleur. 806
Problèmes sur l'acoustique. 814
Problèmes sur l'optique. 815
Problèmes sur l'électricité et le magnétisme. 823

---

23 671. — Imprimerie Lahure, 9, rue de Fleurus, à Paris.