L'ÉLECTRICITÉ

DANS LA NATURE

FAC. N. FILOSOFIA - BIBLIOTECA

OUVRAGES DU MÊME AUTEUR

L'HOMME AU FOND DE LA MER.

LA NAVIGATION ÉLECTRIQUE.

TOUT PAR L'ÉLECTRICITÉ.

F. N. FILOSOFIA
BIBLIOTECA
Rno. 77
1940

BIBLIOTHÈQUE INTERNATIONALE

DE L'ÉLECTRICITÉ ET DE SES APPLICATIONS

L'ÉLECTRICITÉ

DANS LA NATURE

PAR

GEORGES DARY

OR
551.594
D213e

I.F. U.F.R.J.
BIBLIOTECA
REGISTR. 288
DATA 5.10.71

PARIS

GEORGES CARRÉ, ÉDITEUR

58, RUE SAINT-ANDRÉ-DES-ARTS, 58

1892

A la mémoire illustre de Gaston Planté
nous dédions cette suite d'études.

Le célèbre électricien en avait lu quelques fragments dans la Revue internationale de l'électricité, *il voulut bien nous honorer de ses éloges et nous encourager de ses conseils; nous espérions publier ce travail sous son haut patronage, jouir encore longtemps des trésors de son intelligence et de son cœur, lorsque la mort vint l'enlever subitement à la science et à notre affection.*

Nous étions d'autant plus sensible à l'intérêt qu'il nous témoignait que, depuis de longues années, l'inventeur des accumulateurs et de la machine rhéostatique s'était adonné tout entier à la météorologie. Au moyen des merveilleux instruments que son génie avait créés, il accomplit des prodiges. Mais sa modestie l'empêcha de donner le nom de lois à ses admirables recherches. Dans ses ouvrages, il se contente de

décrire ses expériences et de montrer les analogies qui existent entre elles et les phénomènes naturels, et nulle autre part que dans sa conversation il n'était possible de deviner combien sa conviction était profonde; on sentait que sa parole, pourtant calme et douce, vibrait d'enthousiasme à la pensée de la vérité entrevue ; on comprenait que ce savant, penseur, philosophe et physicien tout à la fois, si simple, mais en même temps si ardent, vivait pour son idée, avec elle, par elle.

Attiré nous-même par l'intérêt si vif qui s'attache à ces questions complexes, nous avons suivi dans tous leurs détails les savantes discussions qu'elles soulevaient et soulèvent encore aujourd'hui, il nous semblait que des coïncidences trop répétées ne pouvaient être le résultat d'un hasard, qu'un seul principe, une loi unique devait régir toutes les perturbations de la nature. Pourquoi l'électricité ne serait-elle pas cette force primordiale productive de tant d'effets différents, mais presque toujours dépendants l'un de l'autre ?

C'est ainsi que nous avons successivement étudié l'électricité atmosphérique, sa distribution, ses origines, la formation des orages, les diverses formes d'éclairs, la grêle, les trombes et les cyclones, les tremblements de terre, les aurores polaires.

En présence de la multiplicité des documents, de la

diversité des opinions et de l'ardeur avec laquelle elles étaient défendues, nous avons pensé qu'il serait utile et intéressant de réunir toutes ces théories et ces observations éparses, d'en former un ensemble divisé en autant de chapitres, où ces grands sujets sont magistralement traités tour à tour par MM. Faye, Mascart, Colladon, Zenger, Palmieri, Lemström, Luvini... et tant d'autres, académiciens ou professeurs français et étrangers.

Dans chacun de ces chapitres, nous retrouvons aussi Gaston Planté ; il conclut toujours par assimilation en passant du petit au grand et on ne peut lui en faire un reproche, car Dalibard et Lemonnier ont agi de même pour établir la théorie de l'électricité atmosphérique et la science ne peut perdre aux généralisations du moment où elles ne reposent pas sur un simple travail d'imagination, mais qu'elles sont inspirées par l'observation attentive des faits. D'ailleurs il ne voulut jamais soutenir de polémique en faveur de ses idées; il travaillait à l'écart et laissait tomber toutes les critiques; « le temps, nous disait-il, se chargera de prouver la vérité ».

Bien que nous ayons parfois posé des conclusions, elles ne sont et ne peuvent être que des probabilités vraisemblables. Loin de nous la pensée de vouloir décider entre nos maîtres dans la science, notre seule intention, plus en rapport avec notre faible autorité,

est d'exposer leurs systèmes avec le plus d'impartialité possible ; cependant, les expériences de Gaston Planté nous ont paru donner souvent de lumineuses solutions à une grande partie de ces problèmes.

A bien des titres donc, nous devions placer son nom en tête de ces pages et lui rendre ainsi l'humble hommage de nos regrets et de notre admiration.

GEORGES DARY.

CHAPITRE PREMIER

L'ÉLECTRICITÉ ATMOSPHÉRIQUE

I

PRÉSENCE DE L'ÉLECTRICITÉ DANS L'ATMOSPHÈRE

Si l'on remonte de quelques années dans le passé pour relire la merveilleuse histoire de l'électricité, on pourra se convaincre facilement de la grandeur du sujet et de l'admirable gradation parcourue par toutes les théories qui ont réuni et complété les observations éparses des premiers électriciens. Ceux-ci pressentaient, pour ainsi dire, l'avenir grandiose qui allait s'ouvrir pour cette nouvelle branche de la science; ils étudiaient avec ardeur les minuscules effets de leurs grossières machines pour les analyser précieusement dans leurs moindres détails et se lancer dans des dissertations, naïves pour nous, mais dont les subtilités étaient marquées souvent au sceau du génie.

Ils ignorent d'abord l'origine de ce fluide étrange, mais bientôt de hardies conjectures les guident vers le véritable principe et l'atmosphère subit à son tour leurs audacieuses

interrogations. Quelque vingt ans après, ce sont les découvertes que l'on connaît et dont la succession se déroule régulière dans sa marche pour aboutir à une série de lois immuables dont on avait déjà prévu la généralité. Désormais plus de distinction réelle entre l'électricité et le magnétisme, entre une électricité statique ou dynamique, positive ou négative : invariablement régie par des lois constantes, l'électricité a été faite une. L'étude en fut facile et les applications industrielles sont venues consacrer, par leur utilité pratique, les théories précédentes.

Mais l'électricité n'est palpable et visible que dans ses effets; par son essence même, elle brise les limites étroites dans lesquelles on tente de l'enfermer, et la pensée humaine, qui peut à peine en concevoir la puissance, ne réussit pas à la définir.

Au siècle dernier, Descartes, Nollet, du Fay, Muschenbroek, l'abbé Mangin... nous proposent tour à tour des appellations vagues qui ne nous apprennent rien, telles que : matière subtile, partie intégrante du système général de la nature, feu subtil et particulier, etc... Notre époque, plus scientifique et moins idéaliste, a cru mieux réussir en disant que c'était : la décomposition par le frottement de l'état neutre des corps, le résultat d'une réaction chimique, la conséquence d'une évaporation..., définitions qui, toutes, ne donnent à l'esprit que la satisfaction médiocre de lui faire voir l'une des multiples manières par lesquelles l'électricité s'obtient, mais qui ne la décrivent pas.

Il faut tenter de réunir en une seule conception ces essais de définitions partielles pour avoir une faible idée de l'immensité de cette force inouïe. On en arrive alors à reconnaître que l'électricité est à l'état latent dans tout ce qui existe et se manifeste dès qu'une cause influence ou

modifie les corps, de quelque manière que ce soit : frottement, induction, choc, pression, décomposition chimique, combinaison quelconque, fusion, solidification, vaporisation, chaleur, mouvement... Suivant la structure des corps qu'elle traverse, suivant les milieux qu'elle occupe, elle se propage dans les molécules avec la rapidité de la pensée ou bien se condense sur quelques-unes seulement de ces molécules ; dans tous les cas elle envahit les corps, mais là son effet sera nul pour être ici d'une violence sans limites.

Peu à peu sa présence nécessaire a été partout constatée ; on a étudié les phénomènes naturels, les troubles atmosphériques, et on leur a trouvé une cause électrique : il n'en pouvait être autrement. En effet, s'il est démontré que l'électricité se développe et se manifeste par suite de tout changement apporté dans la nature des corps, il est évident que les phénomènes atmosphériques ou terrestres dégagent de l'électricité, puisque, par suite de leur fréquente violence, ou simplement par leur raison d'être, ils modifient et troublent les milieux. Cette électricité va s'ajouter au phénomène naissant et en former un autre distinct ou connexe et dont la manifestation contiendra toujours dans ses effets totaux ceux que l'électricité lui a apportés. On voit donc que, dans toutes les perturbations naturelles, l'électricité doit tantôt être un principe unique, tantôt remplir le rôle principal, mais toujours devenir la cause importante de leur violence et des effets qu'elle rend plus énergiques par sa présence. Les progrès que la science réalise chaque jour en électricité nous permettent aujourd'hui de poser ces conclusions cherchées si longtemps.

Il est curieux de voir combien ces questions passionnaient nos ancêtres ; moins riches que nous en instruments d'obser-

vation, ils ne pouvaient guère émettre que des suppositions, mais dans lesquelles la vérité apparaît souvent entrevue plutôt que découverte. On croit étudier un auteur moderne en feuilletant ces vieux livres, et l'existence de l'électricité atmosphérique était à peine prouvée, qu'ils posaient des sujets de problèmes, dont quelques-uns sont encore controversés. Par exemple, nous lisons dans Priestley : « De quelle manière les nuages deviennent-ils électriques ? Le vent y contribue-t-il en quelque chose ? Cet effet est-il produit par la chaleur et le refroidissement graduel de l'air ? Si cela est, lequel des deux, de la chaleur ou du refroidissement, produit l'électricité positive ? Lequel que ce puisse être, il est probable que le contraire produira l'électricité négative. L'espace vide qui est au-dessus des nuages ne peut-il pas avoir toujours une électricité opposée à celle de la terre, et le tonnerre, les tremblements de terre, etc..., être occasionnés par l'élancement du fluide entre eux toutes les fois que la surabondance en est excessive dans l'un ou dans l'autre ? L'aurore boréale et d'autres météores électriques qui sont extrêmement fréquents avant les tremblements de terre, n'en fournissent-ils pas quelque degré d'évidence ? La terre n'est-elle pas constamment dans une électrisation modérée et n'est-ce pas là la cause de la végétation, de l'exhalaison et des autres opérations les plus importantes de la nature ? Tout cela devient plus facile par une électrisation augmentée, et il est probable que les tremblements de terre, les ouragans, etc., aussi bien que le tonnerre, sont la suite d'une trop forte électricité dans la terre (1). »

De toutes ces questions, combien sont encore à résoudre ?

(1) J. Priestley, *Histoire de l'Electricité*, 1771. T. III, p. 31.

Ne pourraient-elles pas, tant elles sont actuelles, servir de base à une étude approfondie de l'électricité atmosphérique ? Cette préoccupation constante de tous les esprits, à toutes les époques, nous montre clairement combien il est nécessaire de bien connaître les lois qui régissent l'atmosphère, de constater le rôle important, primordial, que l'électricité y remplit toujours, et, par conséquent, de porter de ce côté nos plus sérieux efforts ; car déterminer exactement la distribution de l'électricité dans l'atmosphère, sa tension, ses origines, c'est prévoir ses manifestations, les annoncer et souvent s'en garantir dans ce qu'elles ont de dangereux.

La célèbre expérience de Dalibard, curé de Marly-la-Ville, peut être regardée comme le point de départ de toutes les curieuses et savantes observations qui ont établi, d'une façon certaine, la présence de l'électricité dans l'atmosphère. Dès 1650, un contemporain d'Otto de Guéricke, le physicien anglais Wall, ayant aperçu un des premiers l'étincelle d'une machine électrique, en conçut l'idée que ce phénomène devait être la représentation en miniature de la foudre. Jean Freke, membre de la Société Royale de Londres, soupçonnait aussi cette analogie ; Hales en Angleterre, Winckler en Allemagne et Franklin en Amérique, l'admettaient en théorie. Enfin Nollet disait, en 1748 : « Si quelqu'un entreprenait de prouver par une conséquence bien suivie des phénomènes que le tonnerre est entre les mains de la nature ce que l'électricité est entre les nôtres ; que ces merveilles, dont nous disposons à notre gré sont de petites imitations de ces grands effets qui nous effrayent, et que tout dépend du même mécanisme ; si l'on faisait voir qu'une nuée préparée par l'action des vents, par la chaleur, par le mélange des exhalaisons, est vis-à-vis d'un objet terrestre ce qu'est un corps électrisé en présence

et à une certaine proximité de celui qui ne l'est pas ; j'avoue que cette idée, si elle était bien soutenue, me plairait beaucoup (1). »

La démonstration expérimentale manquait. Dalibard, secondé par le menuisier Coiffier, la fournit le 10 mai 1752 en tirant des étincelles d'une barre métallique isolée, haute de 13 mètres, et en reproduisant avec cette électricité toutes les expériences déjà faites à l'aide des machines. Il est inutile de donner de nombreux détails sur ces courageuses observations cent fois redites, mais on ne peut cependant les mentionner sans payer un tribut d'admiration à ces savants qui, loin de partager le juste effroi qu'inspiraient les effets terribles de la foudre, accueillaient l'orage avec joie, se faisant une gloire d'être les premiers à en subir volontairement la commotion. La science, le désir de savoir, la fièvre des découvertes les prenaient tout entiers, pour ne les rendre accessibles qu'à la crainte de voir le fluide électrique ne point répondre à leur appel.

On sait que bien souvent ces expérimentateurs furent renversés à leur poste de combat, contusionnés par la violence des secousses, et que l'un d'eux, plus téméraire que les autres, Richmann, fut tué dans son cabinet de travail à Saint-Pétersbourg.

L'expérience de Dalibard fut recommencée à Paris quelques jours après, le 18 mai, par Delort, démonstrateur de physique, dans sa maison de l'Estrapade, puis par l'abbé Nollet, l'abbé Mazeas, le P. Berthier à Montmorency, et enfin par Le Monnier à Saint-Germain-en-Laye, le 7 juin 1752. Il nous apprend : « 1° que la matière électrique paraît aussi quelquefois quand il n'y a que de simples

(1) *Leçons de physique*, par l'abbé Nollet, T. IV, p. 314.

apparences d'orage, lorsque le ciel est chargé de gros nuages qui flottent avec lenteur et qui sont alternativement emportés de côté et d'autre par deux vents contraires ; 2° que le moment où la matière électrique semble se répandre avec le plus d'abondance est plutôt celui de la résolution des nuages en grosse pluie que l'instant où le tonnerre éclate avec le plus de bruit et où les éclairs se succèdent avec le plus de vivacité. Cet effet est même si ordinaire, qu'on ne voit pas tomber de grosse pluie sans qu'elle n'ait été précédée et accompagnée de signes de l'électricité la plus forte (1). »

Le Monnier fut donc le premier à signaler la présence de l'électricité dans l'atmosphère en l'absence des orages que l'on avait cru nécessaires à la formation du fluide.

De Romas, assesseur au présidial de Nérac, avait déjà constaté ce fait, mais sans oser en déduire une conclusion définitive ; il pensait que, dans ce cas, l'électricité était développée par des orages voisins. Au mois de juillet suivant, Cassini de Thuri s'aperçut, à l'Observatoire de Paris, qu'il obtenait des signes sensibles d'électricité en l'absence de toute nuée orageuse.

Les savants des nations voisines, jaloux de ces premières recherches, ne tardèrent pas à suivre l'élan donné par la France, et les observations atmosphériques se continuèrent sur tous les points des deux mondes. Priestley, Kinnersley, Canton, Bewis et Wilson en Angleterre, Franklin en Amérique, Muschenbroek en Allemagne, Zanotti, Verrat et Marin à Bologne, de la Garde à Florence, le P. Beccaria à Turin, Lomonozow en Russie, le prince Gallitzin à la Haye firent successivement des recherches sur l'électricité

(1) *Mémoires de l'Académie royale des sciences de Paris*, 1752, p. 233.

atmosphérique, et cette longue suite de savants s'est continuée sans interruption depuis cette époque déjà lointaine jusqu'à nos jours.

Appareils de Vérification

A. CONDUCTEURS

Avant de classer et d'étudier les résultats de tous ces travaux, de rechercher la distribution de l'électricité dans l'atmosphère et d'en discuter les origines, il nous faut passer en revue les appareils, conducteurs et électromètres, employés à ces observations.

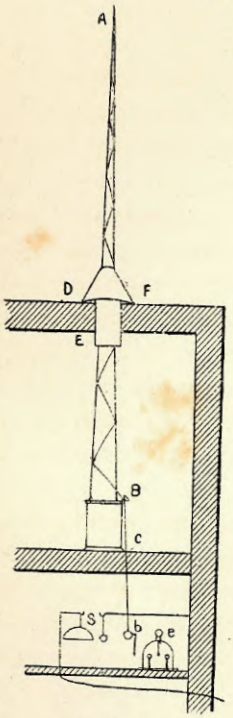

Fig. 1.

Les premiers instruments destinés *à soutirer*, comme on disait alors, l'électricité des nuages orageux, étaient des barres métalliques dressées verticalement, que l'on n'a pas tardé à relier à des électroscopes ou à des électromètres, dont les pendules, par leur écartement, indiquaient la tension et le signe de l'électricité recueillie. Ces conducteurs fixes ont été depuis souvent employés et le sont encore aujourd'hui dans certains cas. Tantôt en métal, tantôt en bois surmontés d'une pointe métallique, ces sortes de paratonnerres isolés peuvent

aussi se composer, comme celui du physicien anglais J. Read (fig. 1), d'une perche de sapin AB de 7 mètres de haut, fixée sur un support isolant de verre BC, enduit d'un vernis à la gomme laque. Un cylindre ou tube de bois DE et un chapeau de fer blanc en forme d'entonnoir DF empêchent la pluie de pénétrer dans l'observatoire; un fil métallique part de la pointe du conducteur, l'enlace dans toute sa longueur et peut se relier à un électromètre *e*, par l'entremise d'un fil attaché à une boule métallique *b*. On suspend avec un fil de soie une autre petite balle de métal qui, en oscillant entre la boule *b* et une sonnette *s*, avertit l'observateur de la présence du fluide.

En cas d'orage violent, il sera facile de transformer en un véritable paratonnerre le conducteur qui pourrait, malgré sa matière, constituer par son isolement un réel danger.

Quelle est l'action de ces conducteurs sur l'électricité atmosphérique? Y a-t-il communication directe du fluide ou influence exercée par lui sur les conducteurs? M. Palmieri a fait son choix depuis longtemps entre ces deux questions, et il soutient que la seconde de ces propositions seule est possible. Devant de nombreuses objections qui lui ont été faites de tous côtés, il reprend la question, et dans ses derniers travaux à l'Académie des sciences de Naples, il en établit la démonstration par des preuves tirées d'observations personnelles.

Il nous dit « que c'est pour cette raison qu'un conducteur fixe, terminé en pointe, emploie un temps relativement long pour atteindre son maximum de charge, lorsque les observations sont faites par un ciel serein et s'il ne tombe pas de pluie à une certaine distance. Volta avait trouvé qu'il faut au moins cinq minutes pour que les pendules de l'électroscope arrivent à leur maximum d'écartement. J'ai

eu plusieurs fois l'occasion de constater l'exactitude de ce fait (1). »

Ce résultat peut prouver jusqu'à un certain point l'induction exercée par l'électricité atmosphérique sur les conducteurs. Mais il est à remarquer que M. Palmieri semble lui-même poser des restrictions et si l'on suppose l'électricité communiquée par le contact de l'air environnant, la charge maxima pourra bien ne s'obtenir qu'au bout d'un certain temps, si par exemple l'électrisation de l'air est très faible et qu'il se produise des variations dans la tension ou dans le signe de cette électricité.

M. Palmieri, du reste, ne s'en tient pas à cette seule démonstration, il en propose une autre : « Si l'on élève rapidement un conducteur bien exposé à une hauteur qui, par des temps favorables, peut n'être que de quelques décimètres, et si l'on met ce conducteur en communication avec un électroscope, on verra se manifester très vite, par des temps ordinaires, de l'électricité positive. Si l'on fait écouler celle-ci dans le sol et que l'on abaisse le conducteur qui se trouve élevé, on verra se manifester (toujours en temps ordinaire) de l'électricité négative (2). »

Cette observation est-elle bien convaincante ? Elle semble plutôt se rapporter à un autre ordre d'idées et on pourrait facilement la prendre pour le commencement de la théorie dans laquelle M. Palmieri tente d'établir que l'électricité des corps terrestres est toujours de signe contraire de celle de l'atmosphère et doit être considérée comme induite (voir plus loin). Nous préférons invoquer la preuve que le savant italien cite d'ailleurs, à savoir : la théorie du pou-

(1) *Lois et origines de l'électricité atmosphérique,* Luigi Palmieri, p. 2, 1885.
(2) *Idem.*

voir des pointes. Il est évident que les conducteurs fixes ne soutirent pas, en général, l'électricité atmosphérique, c'est celle-ci au contraire qui agit sur eux par influence ; ce fait est prouvé depuis longtemps, et dès que l'action du paratonnerre a été bien déterminée, c'est-à-dire peu de temps après son invention, on a compris qu'en temps ordinaire il y a pour ainsi dire une induction constamment exercée par le fluide de l'atmosphère sur ces conducteurs. Il ne faut pas cependant pousser l'analogie jusqu'à l'exagération et il nous semble que cette règle doit admettre de fréquentes exceptions. Si les conducteurs à pointes se trouvent entourés d'air humide fortement chargé d'électricité, la communication doit pour ainsi dire avoir lieu directement et il n'y aura pas seulement induction, mais écoulement du fluide à travers le conducteur. Volta avait essayé d'augmenter la hauteur des conducteurs fixes, nécessairement limitée, en attachant à leur pointe, à l'aide d'une spirale de fer, une mèche de coton soufrée : il l'allumait et la colonne de fumée en s'élevant prolongeait la ligne conductrice de la tige ; mais M. Becquerel nous fait justement craindre les effets composés résultant de la combustion (1) et de plus, comme le dit M. Palmieri, cette adjonction devient inutile lorsque le vent disperse de tous côtés la fumée et que la pluie éteint le feu qui la produit.

On avait déjà cherché le moyen d'étudier l'électricité atmosphérique à de plus grandes hauteurs, et de Romas eut l'idée heureuse d'utiliser dans ce but les cerfs-volants. Plusieurs auteurs, Biot et Becquerel entre autres, accordent ici la priorité à Franklin, alors qu'elle est au contraire grandement due à notre compatriote. Bertholon fait

(1) *Traité de l'Electricité,* E. Becquerel, T. IV, p. 82.

en effet remarquer que, d'après les registres de l'Académie des sciences de Paris du 4 février 1764 : « M. de Romas avait eu cette idée et l'avait communiquée à plusieurs personnes près d'un an avant que M. Franklin en eût fait usage (1), » et bien que l'expérience de Philadelphie date de septembre 1752, elle était inconnue en France quand eut lieu celle de Nérac le 14 mai 1753. Du reste, il n'y a qu'à lire la relation de ces deux expériences pour se convaincre de l'incroyable imprévoyance du savant américain ; il lui fallut le bienfaisant concours de la pluie pour rendre conductrice la corde de chanvre de son cerf-volant, tandis que de Romas avait compris qu'il devait garnir la sienne d'un fil métallique.

Un vent violent ou le calme complet rendait également impossible l'emploi du cerf-volant, et cependant il importait de pouvoir observer continuellement l'état électrique de l'air. Saussure vint combler cette lacune par une ingénieuse innovation : il se servait d'une balle de métal attachée à un fil métallique; la boucle qui le terminait était passée dans le crochet d'un électromètre de manière à ce qu'elle pût en sortir au moindre effort : « Je tiens de la main gauche, dit-il, l'électromètre avec la boucle passée dans son crochet, tandis que, de la droite, je lance la balle en l'air aussi haut que je le puis, la balle entraîne avec elle le fil métallique et au moment où elle parvient à une distance égale à la longueur du fil, la balle et le fil se trouvent en l'air parfaitement isolés, puisque l'extrémité inférieure du fil ne touche plus à rien qu'à la boucle qui est elle-même isolée par l'électromètre dans le crochet duquel elle est passée; mais la balle continuant à s'éloigner entraîne la boucle, la dégage et laisse l'électromètre chargé de l'électricité qui règne dans l'air (1). » Becquerel fit usage ensuite de flèches semblablement disposées et qui, lancées avec l'arc ordinaire, allaient encore plus haut que la balle de Saussure.

(1) *De l'Electricité des météores*, Bertholon.

Enfin, lorsque vint la découverte des aérostats, il était facile de prévoir que, parmi les nombreux services qu'ils pouvaient rendre, l'étude détaillée de l'atmosphère devait être un des plus importants. Les expériences de Biot et de Gay Lussac l'ont démontré et Bertholon l'avait prédit avec raison en disant : « C'est par le secours seul des globes aérostatiques que nous viendrons à bout d'aller soutirer le fluide électrique jusque dans les hautes régions de l'atmosphère où aucun instrument ne peut être lancé (2). »

B. ÉLECTROMÈTRES

L'existence de l'électricité dans l'atmosphère fut bien vite démontrée par les étincelles nombreuses que l'on faisait jaillir à volonté des conducteurs fixes dressés verticalement lorsque les nuages accumulés annonçaient qu'un orage allait éclater. Mais par un ciel serein, les signes d'électrisation étaient faibles et ne pouvaient pas toujours donner lieu à des manifestations visibles. En outre, à mesure que l'on étudiait plus ardemment l'électricité atmosphérique, on ne se contentait plus d'en avoir dénoncé la présence, on désirait en connaître le signe, en déterminer la tension aussi exactement que possible. Il fallait donc employer un appareil spécial, doué de sensibilité extrême, qui fût ca-

(1) *Voyages dans les Alpes*, T. II, p. 196.
(2) *Avantages que la physique peut retirer des globes aérostatiques*, Bertholon, p. 30.

pable de calculer le potentiel et permît d'en déduire des lois définitives. Le problème semblait déjà à demi résolu, car les électromètres que l'on venait d'adapter aux machines à plateaux, pour en mesurer le degré de charge, pouvaient évidemment trouver ici une importante application, sauf à leur imposer les modifications nécessitées par ce nouvel emploi.

Electroscopes et électromètres remplissent un rôle à peu près identique. Les premiers, destinés à accuser la présence de l'électricité dans les corps et à faire connaître le signe de cette électricité, se transforment en électromètres lorsque, convenablement gradués, ils peuvent évaluer le degré de charge des corps électrisés. Nous laisserons de côté les électromètres des machines, c'est-à-dire ceux d'Hanley, de Darcy et Leroy, de Volta, de Coulomb, etc..., pour ne parler que des appareils propres aux observations atmosphériques.

Nollet et surtout Cavallo (1), qui adapta aux fils de l'électromètre les deux balles de sureau, furent les premiers qui essayèrent d'appliquer cet instrument à la météorologie ; mais c'est Canton qui réussit là où ses prédécesseurs avaient échoué, ainsi que nous l'apprend Priestley : « Personne, dit-il, n'avait découvert avant M. Canton que l'air était capable de recevoir l'électricité par communication et de la conserver quand il l'a reçue ; mais, au moyen d'une de ses excellentes inventions, il parvint à s'en assurer et même à en mesurer le degré... Il prit deux petites balles de sureau sèches et faites au tour, les mit dans une boîte étroite dont le couvercle était à coulisse et les disposa de telle façon que les fils, qui étaient du lin le plus fin, se tenaient

(1) Cavallo, *Traité de Physique*, p. 129.

droits dans la boîte. Si l'on tient cette boîte par le bout du couvercle, les balles pendent librement d'une petite pointe qui est en dedans. Ces balles, suspendues à une distance suffisante des bâtiments, des arbres, etc..., font connaître aisément l'électricité de l'atmosphère ; elles déterminent aussi si l'électricité des nuages est positive par le décroissement, ou négative par l'accroissement de leur répulsion quand on en approche de l'ambre ou de la cire d'Espagne (1). » Canton ne fut pas longtemps sans remplacer la boîte par un globe de verre qui garantit mieux le double pendule des agitations de l'air extérieur.

Puis vient Volta qui supprime les balles de sureau et leur substitue des pailles. Cet électromètre, selon le savant italien, donnait des résultats certains jusqu'à une divergence de 26°. Becquerel nous fait remarquer à ce sujet : « Malgré l'autorité de Volta, nous ne pouvons nous expliquer, d'après la loi qui régit les mouvements du pendule, comment il se fait que deux brins de paille soumis à l'action de la pesanteur donnent jusqu'à 26° des écartements proportionnels aux forces électriques (2). » Et d'ailleurs, ajoute-t-il, de l'aveu de Volta lui-même, le condensateur à plateau est trop inexact pour servir à des observations délicates.

Electromètre de Saussure. — C'est pourquoi Becquerel préfère l'électromètre de Saussure ainsi que son mode de vérification. Il fallait, en effet, régler l'écartement des pendules et déterminer le rapport qui pouvait exister entre cette divergence et l'intensité de l'électricité recueillie. A cet effet, Saussure prenait deux électromètres à feuilles d'or

(1) Priestley, *Histoire de l'Electricité*, T. I, p. 371.
(2) Becquerel, *Traité d'Electricité*, T. IV, p. 82.

aussi semblables que possible; l'un d'eux étant chargé de manière à ce que les balles divergent de six lignes par exemple, il établissait un contact entre cet électromètre et le second; la charge se partageant entre eux, l'intensité fut alors de 4 lignes. L'intensité électrique, diminuée de moitié, avait seulement réduit la divergence de 1/3. En déchargeant l'un des électromètres et en établissant le contact, l'écartement descendit à 2,8 puis, après une nouvelle opération, à 1,9. Saussure formait ainsi une sorte de table que chaque observateur devait établir de la même manière.

Fig. 2.

L'appareil de Saussure (fig. 2) se compose d'un électromètre à feuilles d'or surmonté d'une tige métallique aiguë et garanti de la pluie par un chapeau de fer. Il constitue à lui seul un ensemble propre aux observations de l'électricité atmosphérique.

Electromètre Peltier. — C'était déjà un progrès de réalisé; cependant, malgré ses qualités, cet instrument comme les précédents a de nombreux défauts; car, tout en suivant les règles de graduation indiquées par Saussure, il est impossible de calculer exactement la divergence des balles de sureau soumises à tant d'actions différentes et d'établir, d'après ces écartements, une loi bien certaine. Il

peut encore se produire par la pointe métallique des déperditions considérables de fluide suivant l'état hygrométrique de l'air; de là des erreurs nombreuses qu'il n'est pas possible d'éviter.

L'électromètre de Peltier supprime en grande partie toutes ces causes d'inexactitude; il est basé sur une simple et ingénieuse combinaison : la tension électrique est représentée par l'angle que fait une tige fixe avec une aiguille mobile située dans le méridien magnétique. C'est l'électromètre de Coulomb habilement modifié.

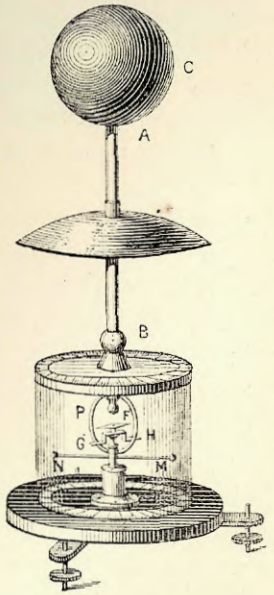

Fig. 3

Dans une cage cylindrique de verre (fig. 3), sur un support également en verre et verni à la gomme laque, se trouve une aiguille fixe métallique MN et deux aiguilles mobiles solidaires l'une de l'autre : la première F est aimantée, et la seconde GH est en fil de cuivre recourbée à ses extrémités. Une tige cylindrique en cuivre BA s'élève au-dessus de la chape qui porte ces deux aiguilles et à laquelle elle est reliée par le fil P recourbé en cercle; cette tige traverse la base supérieure de la cage de verre et se termine en C par une sphère de cuivre creuse de 0,10 *m* de diamètre environ. Une autre boule B, beaucoup plus petite, est placée sur un tampon de gomme laque qui contribue encore à isoler la tige AB; on peut reposer cette tige sur la chape des

aiguilles en tournant la boule B. Un chapeau métallique sert à garantir l'électromètre de la pluie.

Pour observer, on tourne la boule B, la tige se soulève, puis on oriente l'appareil : à cet effet, on place l'aiguille fixe MN dans le plan du méridien magnétique, ce qui s'obtient en faisant coïncider la direction des aiguilles mobiles avec celle de l'aiguille fixe. Cela fait, si l'on présente à la sphère supérieure C un corps électrisé positivement par exemple, elle se charge d'électricité de signe contraire et les aiguilles, fixe et mobile, se chargent par influence de l'électricité de même signe, c'est-à-dire positive ; elles se repoussent et le fil GH s'écarte angulairement de l'aiguille fixe MN jusqu'à ce que la répulsion des deux corps soit équilibrée par la force directrice de l'aiguille aimantée. Si l'on touche du doigt la tige AB, l'électricité positive s'écoule dans le sol et l'appareil prend une charge permanente négative. On peut remplacer la sphère C par une pointe et, dans ce cas, l'électricité négative s'écoulant par la pointe, l'appareil prend une charge permanente positive.

Peltier nous donne à ce sujet les détails suivants : « Lorsque je veux interroger la tension électrique de l'atmosphère, je monte sur la terrasse, je place l'instrument sur une tablette élevée de 1,50 *m*, je l'équilibre en touchant la tige dans sa partie la plus inférieure, puis je redescends et je place l'instrument sur une tablette qui lui est destinée. Lorsqu'on équilibre l'instrument, il faut élever le bras le moins possible, car si on l'élevait assez pour toucher le globe, la main, devenant résineuse par influence, repousserait l'électricité résineuse de la boule, elle y neutraliserait la portion vitrée qu'elle y attirerait, et l'instrument serait chargé résineusement au moment de

l'éloignement de la main. Il faut donc toucher la tige le plus bas possible et même avec un corps fin comme un fil métallique pour éviter l'influence de la masse de la main sur le reste de la tige. Etant équilibré pendant son élévation, l'instrument en se baissant donne des signes d'électricité résineuse, tandis qu'en se levant, il en donnerait de vitrée. Lorsqu'on opère ainsi, il faut donc se rappeler ce changement de signe pour ne pas donner une électricité contraire à l'atmosphère. On notera une tension vitrée lorsque l'électromètre donnera un signe résineux en descendant, de même on indiquera une tension résineuse dans l'atmosphère si l'instrument descendu dans le cabinet donne un signe zéro (1). »

Electromètre Thomson-Branly. — L'électromètre de Peltier est employé fréquemment encore aujourd'hui. Cependant on lui préfère, surtout en Angleterre, l'électromètre de Thomson, modifié par M. Branly. Une aiguille d'aluminium en forme de 8, suspendue par un double fil, oscille entre quatre secteurs ou quadrants métalliques qui, isolés les uns des autres, sont réunis diagonalement deux à deux aux pôles d'une pile. Un miroir métallique concave est suspendu au-dessous de l'aiguille mobile par une tige rigide et en suit ainsi tous les mouvements. L'aiguille communique électriquement avec l'eau contenue dans un cylindre de métal isolé par des pieds de verre : c'est le collecteur de l'électricité atmosphérique. L'eau, constamment fournie à ce cylindre par un réservoir, s'échappe à l'extérieur en un jet de très petit diamètre.

Le collecteur se charge par influence, l'électricité de

(1) Peltier, *Recherches sur les phénomènes électriques*, p. 15.

signe contraire s'écoule par le filet d'eau, et l'électricité de même signe est repoussée dans l'électromètre jusqu'à l'aiguille qui dévie sous l'action des quadrants électrisés par la pile. Si le miroir reçoit les rayons lumineux d'une lampe et les réfléchit sur un écran gradué, on pourra lire plus facilement les diverses variations de l'aiguille.

Electromètre enregistreur Mascart. — Dans le désir d'être constamment renseignés sur la tension électrique de

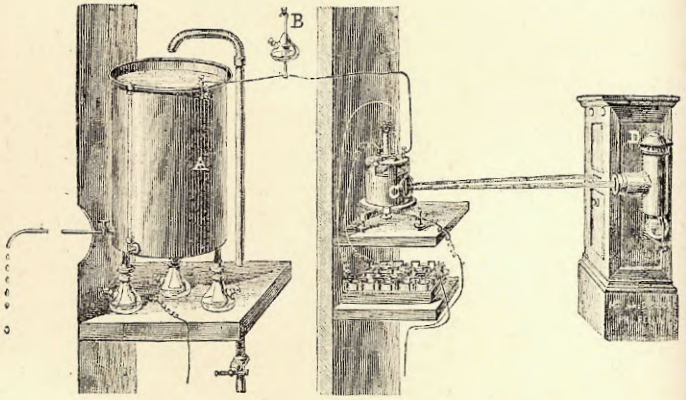

Fig. 4

l'atmosphère, les savants ont voulu supprimer la présence jusque-là nécessaire d'un observateur près de l'appareil et avoir des électromètres enregistreurs qui puissent eux-mêmes noter les résultats (fig. 9).

Grâce à la photographie, on a rapidement résolu cette délicate question, car on conçoit aisément que le jet lumineux, envoyé sur le miroir de l'électromètre Thomson, puisse être reçu dans une chambre noire et là y impressionner une plaque préparée (fig. 4). Mais M. Mascart, reprenant

la question en 1877, s'aperçut que la photographie avait de graves inconvénients. Les mouvements de l'aiguille et du miroir étaient souvent trop rapides pour que la plaque

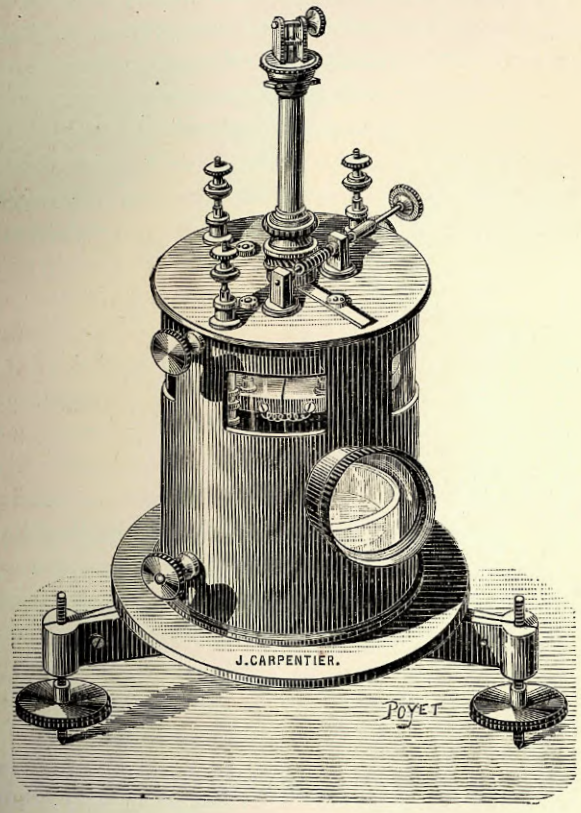

Fig. 5

fût suffisamment impressionnée ; il en résultait des lacunes nombreuses dans l'enregistrement. Il abandonna donc ce système pour y substituer des rouages fort compliqués, qui

malheureusement étaient sujets à des dérangements fréquents. La marche irrégulière de tous ces mécanismes entravait le fonctionnement de l'aiguille et lui enlevait son extrême sensibilité, quand cela ne l'arrêtait pas complètement. La découverte récente du papier préparé au gélatino-bromure d'argent a permis à M. Mascart d'abandonner les rouages d'horlogerie, et la photographie est venue de nouveau servir d'enregistreur aux observations électro-météorologiques.

Si l'on en excepte l'appareil enregistreur, l'électromètre de M. Mascart (fig. 5) diffère très peu de celui de Thomson-Branly. On retrouve le même principe de la veine descendante liquide conduisant l'électricité atmosphérique à l'aiguille en forme de 8, EF (fig. 6), suspendue entre les quatre secteurs ABCD électrisés deux à deux. Il a cependant apporté quelques modifications dans la suspension de cette aiguille dont il a su régulariser les oscillations.

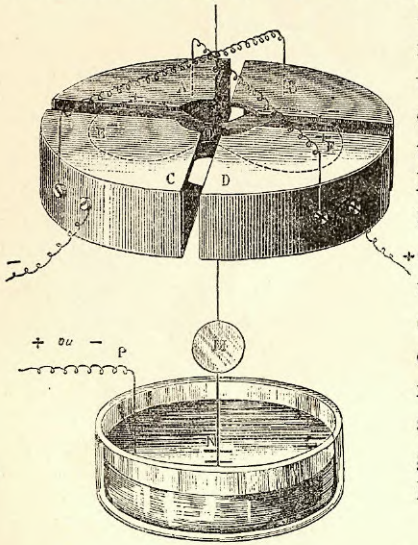

Fig. 6.

La communication entre le collecteur et l'aiguille se fait par l'intermédiaire de l'acide sulfurique qui remplit une cuvette dans laquelle plonge le fil rigide de l'aiguille ON et le fil P adducteur de l'électricité atmosphérique. A l'état de

repos, toutes les pièces communiquent avec le sol et l'aiguille doit se trouver également couverte par les deux paires de secteurs. Si l'on charge ceux-ci également d'électricité de signe contraire, l'aiguille, restant reliée au sol, se maintient dans la même position ; mais si, en même temps, elle reçoit une charge électrique soit positive, soit négative, l'un des deux systèmes de quadrants exerce sur elle une action attractive, l'autre une action répulsive, et par suite de ces actions contraires, elle dévie soit d'un côté soit de l'autre selon le signe de l'électricité qui lui a été communiquée.

M. Mascart a ensuite apporté tous ses soins à bien isoler le collecteur d'électricité. Ce point est évidemment capital, car il s'agit d'obtenir des résultats aussi exacts que possible, avec une source d'électricité extrêmement faible. M. Mascart dit à ce sujet : « L'une des causes d'erreurs qui me paraît avoir été trop souvent négligée, c'est le parfait isolement des appareils. Un électromètre, électrisé par une influence temporaire ou mis en communication avec un appareil à écoulement, n'atteint qu'une fraction inconnue quelquefois très faible du potentiel qu'il devrait prendre si les pertes d'électricité par les supports étaient négligeables. Or les propriétés isolantes de supports ordinaires, des tiges de verre exposées à l'air par exemple, varient beaucoup avec l'état de l'atmosphère et plusieurs causes contribuent à augmenter leur conductibilité pendant la nuit. Il est donc nécessaire d'employer des supports dont l'isolement soit absolu et indépendant des conditions atmosphériques ; on peut craindre que cette cause d'erreur n'ait conduit souvent les observateurs à méconnaître le maximum du potentiel qui m'a paru régulier pendant la nuit (1). »

(1) *Comptes rendus de l'Acad. des Sciences pour* 1880, T. II, p. 158.

Les isolateurs de M. Mascart (fig. 7) sont formés de carafes en verre remplies au quart d'acide sulfurique concentré et dont le fond se relève à l'intérieur en un tube qui se prolonge jusqu'au delà du goulot qu'il dépasse; un chapeau métallique, qui glisse le long de la tige, permet de fermer presque entièrement l'ouverture du flacon, mais sans toucher les bords. Les fils conducteurs sont isolés de

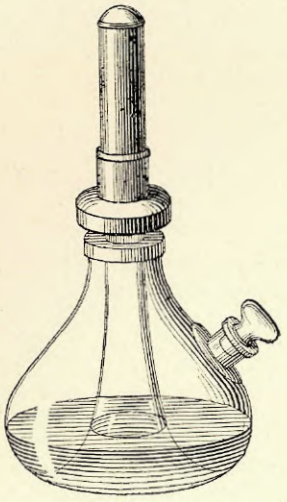

Fig. 7.

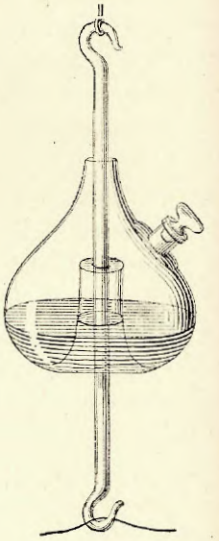

Fig. 8.

la même manière; mais, dans ce cas, le tube ouvert à l'intérieur (fig. 8) livre passage à une tige de verre portant deux crochets à ses extrémités; l'un des crochets sert à suspendre l'isolateur, l'autre à soutenir le fil. La carafe doit contenir une certaine quantité d'acide sulfurique concentré destiné à dessécher la tige.

Suivant M. Palmieri, ces isolateurs sont loin d'avoir

les qualités que leur attribue leur auteur : « A part leur incommodité, dit-il, ils ne peuvent fonctionner que pendant un certain temps, difficile à déterminer et au delà duquel il devient nécessaire de changer l'acide (1). » M. Palmieri attaque ensuite M. Mascart au sujet de son électromètre, d'abord en ce qui concerne la veine liquide descendante qu'il a cru devoir abandonner pour la raison suivante : impossibilité d'obtenir un écoulement constant dont la vitesse est troublée par le vent qui agite le jet liquide ou par le froid qui le congèle, ce qui produit soit des variations dans les résultats, soit un arrêt complet des observations. M. Mascart reconnaît d'ailleurs toute la force de ces objections, quand il dit : « Les froids exceptionnels de décembre 1879 auraient présenté un intérêt particulier, malheureusement les précautions que nous avons prises contre la congélation de l'eau d'écoulement ont été insuffisantes (2). » Enfin M. Palmieri achève de donner son avis sur cet appareil en déclarant que les courbes obtenues par la photographie sont erronées à cause des pertes inévitables et que par suite « elles n'ont aucune valeur scientifique ». Ce dernier reproche ne paraît pas bien fondé et l'opinion de M. Palmieri n'est pas celle de tous, puisque l'appareil de M. Mascart fonctionne dans la plupart des grands observatoires de France (3).

(1) *Lois et origines de l'électricité atmosphérique*, Palmieri, p. 9.

(2) *Comptes rendus de l'Acad. des Sciences*, pour 1880. T. II, p. 159.

(3) Nous ne devons pas oublier de mentionner à titre de curiosité deux essais qui, pris parmi cent autres, prouvent l'importance du but et les avantages que les appareils enregistreurs semblent avoir sur les autres.

Citons d'abord celui que le P. Beccaria avait imaginé et qu'il appela du nom significatif de *Ceraunographe*. Son invention était évidemment défectueuse à plus d'un point de vue et sans utilité pra-

M. Fines propose une méthode de dépouillement des courbes obtenues par l'appareil de M. Mascart. Comme ces courbes forment quelquefois des angles très aigus, et peuvent même dépasser la valeur de mille éléments, il faut régulariser celles-ci en faisant passer une ligne par le milieu des irrégularités de la courbe et compter le nombre de millimètres compris entre la *courbe régularisée* et la ligne du repère ou du zéro (fig. 9) ; on obtient ainsi la valeur de la tension électrique en éléments.

tique puisqu'elle ne pouvait servir que dans des cas exceptionnels, mais elle n'en présente pas moins une originalité qui décèle chez le savant religieux un incroyable esprit de recherche : une pointe de fer communique à un conducteur fixe isolé et un fil métallique, non isolé, servant d'excitateur est placé à une très petite distance. Entre ces deux pointes tourne un disque de carton mince mû par un mouvement d'horlogerie ; les étincelles qui jaillissent percent le carton et le nombre, la grandeur des trous, leurs positions indiquent exactement l'heure à laquelle se manifeste l'électricité atmosphérique, ainsi que sa tension.

D'autre part l'ingénieuse tentative de M. Monnet, employé des télégraphes, mérite quelque attention.

Il avait remarqué que les appareils autographiques de Caselli étaient fortement impressionnés par l'électricité atmosphérique : «... le fil télégraphique, influencé comme la couche qu'il traverse, se charge de fluide *positif ou négatif* et le fluide de nom contraire court se perdre dans le sol où est relié le conducteur. Ce courant électrique traversant le papier impressionnable, destiné à la reproduction de l'autographe, y reproduira évidemment le même effet que la pile débitant dans le même sens ; par exemple le fluide positif, s'écoulant à travers le papier, y laissera une trace bleue comme les traits chimiques de l'épreuve. De plus si cet écoulement est continu, gradué, le papier sera chiné, moiré, strié de petites raies bleues disposées par zones... » (Monnet, *Nouveau procédé pour étudier l'élect. atm.* p. 6).

Le fluide négatif produit des effets différents et une décharge violente sillonne profondément le papier.

M. Monnet propose en conséquence de se servir de l'appareil électro-chimique Bain ou d'un autre système analogue et d'y faire

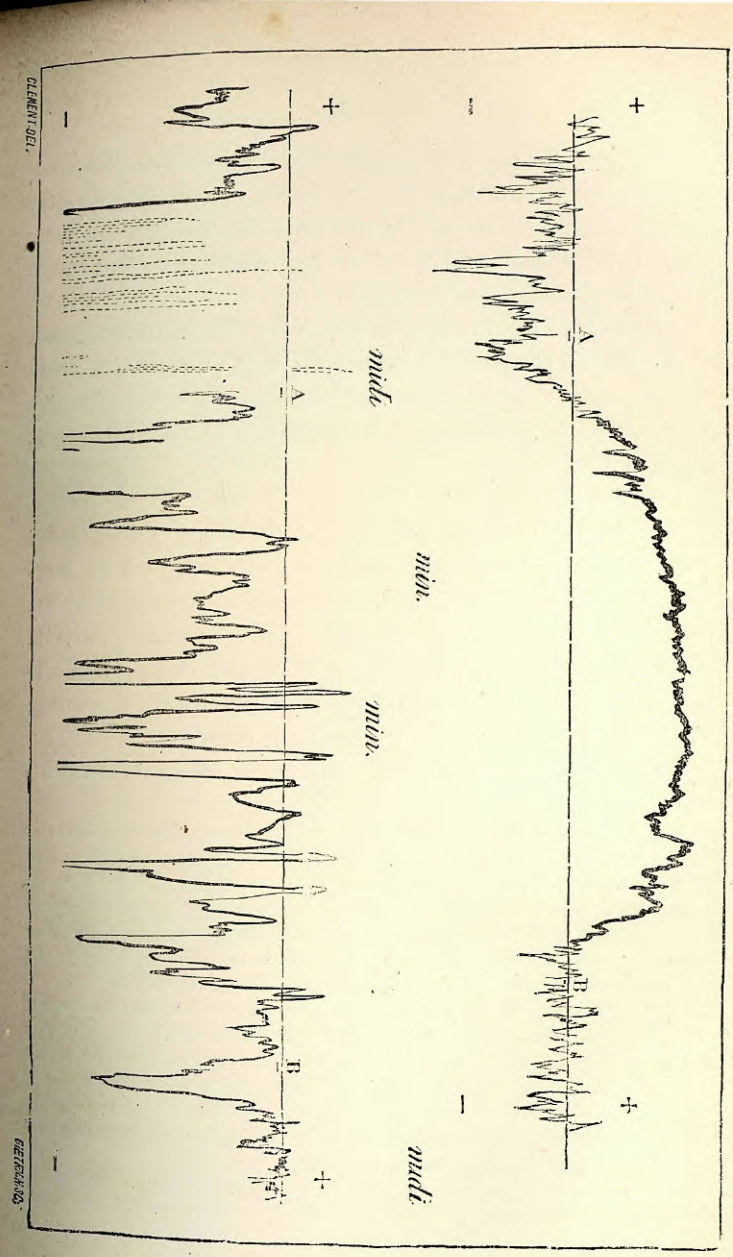

Fig. 9

Puisque l'électricité atmosphérique normale est positive, il considère comme troublées les journées pendant lesquelles la courbe passe au négatif, c'est-à-dire en dessous de la ligne de repère, et dans ce cas, il fait précéder les valeurs correspondantes du signe négatif.

Toutes les valeurs des journées troublées ou incomplètes sont notées avec des caractères différents de ceux des journées *complètes, positives et sans trouble*, qui servent seules au calcul des moyennes mensuelles et des variations diurnes (1).

Electromètre Palmieri. — M. Palmieri s'était servi pour ses premières observations de l'électromètre de Peltier, mais le savant et consciencieux météorologiste ne pouvait se contenter d'un appareil évidemment imparfait; il s'efforça d'en supprimer les défauts par des perfectionnements successifs, et le nouvel électromètre qu'il a construit possède, d'après lui, toutes les qualités.

Conduit par ses expériences à étudier les effets conduc-

arriver l'électricité atmosphérique par l'entremise d'un conducteur fixe métallique ou d'un aérostat captif à armatures de fer. Les résultats se trouveraient notés sur des bandes de papier divisées en secondes et en minutes et qui seraient déroulées par un mouvement d'horlogerie. Ce papier teinté de tournesol et d'azotate neutre d'ammoniaque présenterait une couleur rouge ou verte suivant le sens du courant et donnerait par suite le signe de l'électricité recueillie.

Cette proposition pourrait certainement servir de point de départ à des recherches utiles, mais telle qu'elle nous est présentée elle semble inapplicable. L'électricité de l'atmosphère recueillie par un fil long de plusieurs lieues comme les lignes télégraphiques peut il est vrai impressionner l'appareil Caselli, mais il n'en sera plus de même lorsqu'un seul conducteur isolé jouera le rôle d'excitateur en face d'un potentiel relativement faible.

(1) Congrès de Toulouse. — Septième section. — Météorologie. — Séance du 26 septembre 1887.

teurs des veines liquides descendantes, il avait d'abord conçu le projet de s'en servir pour l'étude de l'électricité atmosphérique. L'eau s'écoulait en petits jets d'un vase métallique isolé A (fig. 10) situé à une certaine hauteur et venait tomber dans une coupe C non isolée; un électroscope relié au vase A accusait en temps ordinaire la présence d'électricité positive. Si au contraire le vase

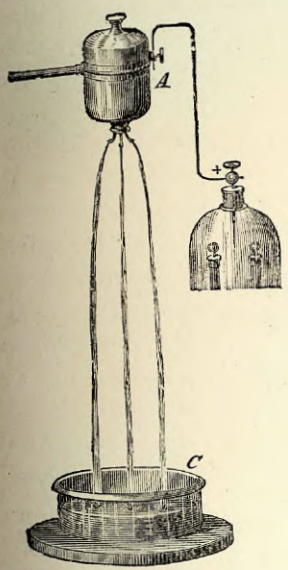

Fig. 10.

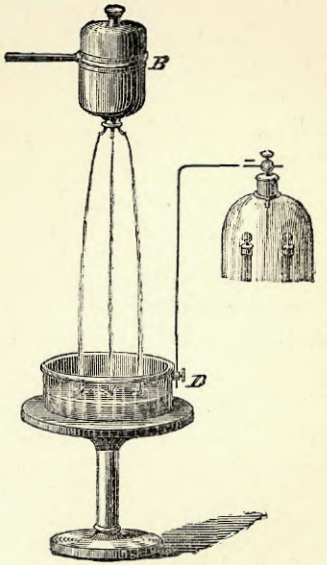

Fig. 11.

métallique B était mis en communication avec le sol et que la coupe isolée D fût reliée à l'électroscope, celui-ci donnait des signes d'électricité négative (fig. 11).

Une veine ascendante et retombante donnait les mêmes résultats, c'est-à-dire de l'électricité positive en temps ordinaire lorsque l'électromètre communiquait avec la

INSTITUTO DE FISICA DA U.F.R.J.

portion montante, et négative lorsqu'il touchait la portion descendante.

Mais M. Palmieri nous a dit lui-même, si l'on s'en souvient, pourquoi il abandonna ce système dont la constance et l'isolement parfait nécessaires ne pouvaient s'obtenir; de plus, la congélation du jet d'eau pendant les grands froids était impossible à éviter.

Il rejette ensuite comme inexactes les observations des appareils à indications continues, car « tandis que l'instrument fournit une déviation d'un certain nombre de degrés, si l'électricité inductrice vient à diminuer, l'appareil continuera à indiquer une même charge jusqu'au moment où, par suite des déperditions, il ne l'atteindra plus. »

Il ne semble pas que cette observation ait toute la force que veut lui attribuer M. Palmieri, car alors l'électricité induite ne serait plus proportionnelle à l'électricité inductrice et quand bien même il s'écoulerait un temps donné entre la première charge et la diminution de cette charge, l'instrument enregistreur en avertirait les observateurs et l'inscription n'en serait pas moins exacte.

De plus, cette remarque de M. Palmieri vient à l'encontre de sa théorie dans laquelle il affirme une induction constante exercée par l'électricité de l'atmosphère sur les conducteurs, et l'on comprendrait mieux que l'appareil puisse conserver une charge supérieure au potentiel de l'atmosphère, si l'on supposait que cette électricité lui était communiquée par le contact.

Quoiqu'il en soit, M. Palmieri abandonne le système à veine liquide de M. Mascart ainsi que tout appareil enregistreur, et il exige la présence constante d'un observateur qui selon lui est nécessaire pour assurer l'exactitude rigoureuse des résultats.

Son électromètre se compose de deux parties : l'électromètre proprement dit et le conducteur mobile qu'il a cru à l'inverse de Peltier devoir rendre indépendant. Voici les modifications quil a apportées à l'électromètre Peltier.

L'aiguille aimantée est supprimée (fig. 12) et la tension électrique se mesure par l'écart que fait une aiguille mobile d'aluminium suspendue par un système bifilaire S reposant sur un disque de même métal avec une tige fixe horizontale *ee*. Une graduation est inscrite sur les parois du cylindre de verre protecteur A. La base *dd* de l'électromètre est en verre enduit de gomme laque et le support *aa* des aiguilles est isolé par un manchon *b* de mastic qu'il appelle *scagliola* et dans la composition duquel entrent 2/3 de poix grecque et 1/3 de plâtre calciné. Suivant M. Palmieri ce mastic constitue une matière isolante parfaite et ne se ramollit jamais même pendant les plus fortes chaleurs de l'été.

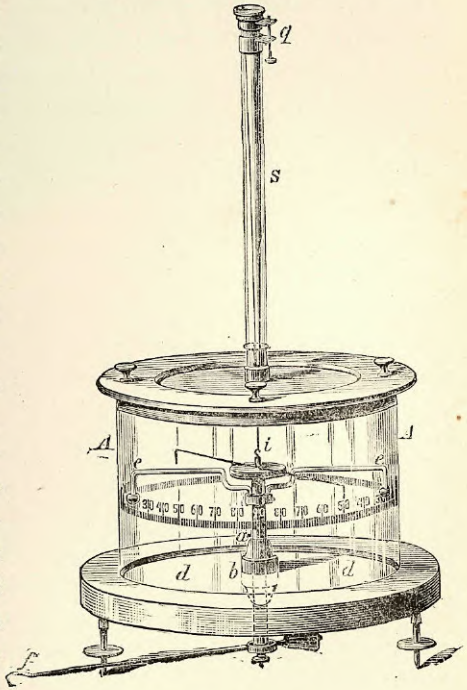

Fig. 12.

Si une charge électrique arrive à l'électromètre par la

tige conductrice *f* placée à la partie inférieure de l'appareil, les deux tiges fixe et mobile se repoussent, l'index mobile dévie et parcourt un arc, dit impulsif, pour revenir en arrière et s'arrêter à la limite d'un autre arc que M. Palmieri appelle arc définitif.

Ces deux arcs sont proportionnels aux charges jusqu'à 70°; suivant la vérification faite par le professeur Guido Grassi et, d'après les calculs de M. Battaglini, l'arc définitif doit être à peu près la 1/2 de l'arc impulsif. Il serait bon, dit M. Palmieri, d'établir par des temps favorables ce rapport pour chaque instrument, afin de savoir s'il y a eu des pertes sensibles et de pouvoir dans ce cas les évaluer.

Quant à l'appareil au moyen duquel M. Palmieri met son électromètre en relation avec l'électricité atmosphérique, il consiste en un léger plateau de laiton *b* de 0,27 *m* de diamètre (fig. 13), supporté par une tige de même métal *aa* qui peut s'élever de 1,50 *m* au-dessus du toit de l'observatoire H, au moyen d'un système de cordons de soie. Cette tige communique à l'électromètre AA et est mise en relation avec un électroscope de Bohnenberger B pour faire connaître le signe de l'électricité recueillie (1).

Pour observer, M. Palmieri élève rapidement le conducteur mobile, l'index de l'électromètre dévie : c'est l'arc impulsif qui doit exprimer la mesure de l'électricité induite et par conséquent le potentiel de l'atmosphère. Puis, le

(1) Nous rappelons que l'électroscope condensateur de Bohnenberger, professeur de physique à Tubingue, se compose de deux piles sèches Zamboni ou Watkins dressées verticalement, les pôles de signe contraire en regard; une feuille d'or est placée entre ces deux pôles et, dès qu'elle a reçu une très faible quantité d'électricité, elle est attirée par le pôle qui possède l'électricité de signe contraire. — *Voir Bibliothèque Univ., novembre 1820*, et *Annales de Phys. et de Chimie, T. XVI.*

conducteur étant abaissé et séparé de l'électromètre, on obtient l'arc définitif qui est, d'après ce qui a été dit plus haut, la vérification de l'arc impulsif.

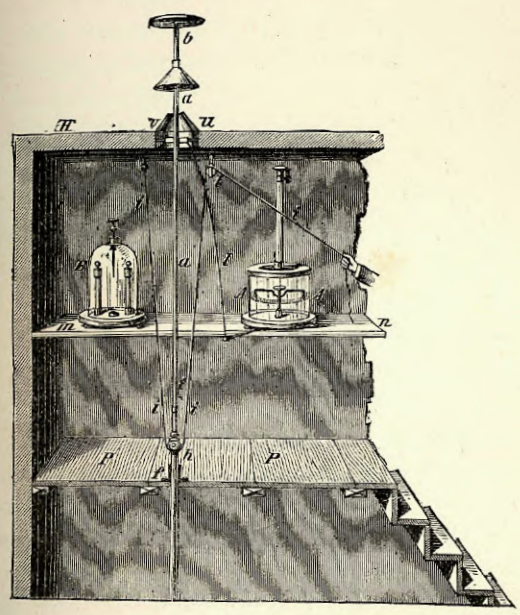

Fig. 13.

« Si l'arc définitif reste plus petit qu'il ne devrait être, alors à l'arc impulsif observé on ajoutera la perte connue et l'on aura une observation corrigée. En prenant soin d'avoir un bon isolement, il sera rarement nécessaire de recourir à la correction. Malgré cela, il y a cependant des moments où il règne une humidité extraordinaire, pénétrant dans la chambre, et dans ces cas, lorsqu'on élève le conducteur, l'index reste immobile ou, après une faible déviation, revient rapidement au zéro. Dans ces circon-

stances, on dessèche les lacets de soie, on réchauffe l'isolateur de verre en le frottant avec une étoffe chaude et sèche; on regarde si, de son côté, l'électromètre ne subit pas de fortes pertes, pour le chauffer au besoin. Ces précautions prises, on peut procéder aux observations. Ces cas sont d'ailleurs fort rares, surtout lorsque la pièce est bien sèche.

« Avec les divers appareils dont on s'est servi jusqu'à présent, il n'est pas possible, par certains temps, d'éviter les pertes; tout ce que l'on pouvait souhaiter, c'était de pouvoir les mesurer.

« Soient x la mesure rectifiée, a celle que donne l'observation et y la perte. On aura

$$x = a + y$$

« Si l'on connaît y on peut regarder x comme connu.

« Nous avons dit qu'on élève le conducteur avec rapidité : deux secondes sont le temps que réclame ordinairement cette opération; mais la pratique montrera entre quelles limites il faut faire varier cette vitesse pour obtenir le même arc impulsif. Chacun comprend que, quand il s'agit d'électricité induite, la rapidité des mouvements est nécessaire : il suffit de rappeler que, lorsque l'humidité est excessive, il faut élever le conducteur plus vite.

« Après avoir mesuré le potentiel, pour savoir si l'électricité dominante est positive ou négative, on réunit, pour un moment, le conducteur à un électromètre de Bohnenberger, on l'élève de quelques centimètres et l'on voit dans quel sens la feuille d'or dévie (1). »

(1) *Lois et origines de l'électricité atmosphérique*, Luigi Palmieri, p. 28.

En quoi consiste la supériorité de l'électromètre de M. Palmieri? Nous regrettons de n'avoir à ce sujet que l'avis de l'inventeur lui-même. Mais nous devons remarquer que, en France, on se sert généralement de l'électromètre de M. Mascart; en Angleterre et en Allemagne de l'électromètre de Thomson-Branly et que l'électromètre Peltier est encore employé concurremment avec ces derniers en Belgique, en Hollande et en Suède. En Italie même, l'électromètre de M. Palmieri n'est pas le seul adopté, car nous y retrouvons l'appareil Mascart modifié par Antonio Roïti et Luigi Pasqualini.

Cependant, les longues années que M. Palmieri a employées exclusivement à l'étude de l'électricité atmosphérique sont loin d'avoir été infructueuses; c'est la persévérance du météorologiste italien, ses études approfondies, ses continuelles expériences relatées dans de nombreux rapports qui ont entraîné à sa suite les savants du monde entier et ont excité les recherches sur cette question difficile. L'infatigable directeur de l'Observatoire du Vésuve est toujours resté à son poste et ne s'est pas détourné du but un seul instant. Mais la grandeur du sujet est telle que pour le traiter il faudrait s'élever par de larges conceptions qui permissent de le considérer dans son ensemble, et d'en retracer à la fois les causes, les manifestations et les effets.

M. Palmieri s'est peut-être trop attaché aux détails et il n'a pas suffisamment tiré parti de ses nombreuses observations pour arriver à des lois générales concluantes.

II

DISTRIBUTION DE L'ÉLECTRICITÉ DANS L'ATMOSPHÈRE

Bien que l'électricité nous enveloppe de toutes parts, elle n'est pas également distribuée dans l'atmosphère. Ici la tension est nulle, là elle est modérée, pour échapper plus loin par sa violence à toute espèce de contrôle.

Les différents états hygrométriques de l'air, le voisinage de corps plus ou moins bons conducteurs, les conditions climatériques, les diverses saisons, l'évaporation plus ou moins grande sous l'influence des rayons solaires, sont autant de causes qui changent, augmentent ou diminuent le potentiel électrique de l'atmosphère.

Quelque parfaits que soient les instruments à l'aide desquels on a étudié l'électricité atmosphérique, il est facile de concevoir que les résultats obtenus ne peuvent pas être toujours d'une exactitude rigoureuse et que des lois, fondées *uniquement* sur ces résultats, doivent être souvent erronées. Est-il possible de prévoir tous les changements subits qui surviennent à chaque instant dans l'état de l'atmosphère et d'en tenir compte dans les observations? Combien de fois, cependant, des météorologistes n'ont-ils pas voulu tirer des déductions définitives de travaux effectués dans un même lieu, avec les mêmes moyens, et transformer un cas particulier en loi générale.

D'un autre côté, les électromètres sont loin de donner

des résultats proportionnels aux variations de conductibilité de l'atmosphère. Lorsqu'il s'agit de changements notables, il est évidemment facile d'avoir des renseignements à peu près exacts. Par exemple, si l'appareil ne donne aucun signe ou un signe très faible d'électricité, on sait que le potentiel des hautes régions peut être considérable, étant donné qu'une couche d'air sec et chaud est interposée; de même, l'appareil accuse un potentiel élevé lorsque des brouillards amènent l'électricité atmosphérique au niveau du sol, tandis que la tension réelle de l'atmosphère, dans les régions moyennes, est presque nulle. Mais, entre ces deux cas extrêmes, combien de modifications, de troubles apportés par des nuages de différentes compositions, des vents de diverses directions, par des expositions multiples qui varient à l'infini, par la nature des terrains au-dessus desquels on opère; et quelle utilité pourra-t-on recueillir de notations spéciales pour des circonstances qui ne se représenteront jamais exactement semblables? Souvent même, de l'aveu de M. Palmieri, il faut agir rapidement pour obtenir un résultat, la déperdition du fluide étant quelquefois instantanée et complète.

Il faut donc se garder d'attribuer aux électromètres, tels qu'ils existent, plus d'importance qu'ils ne peuvent en avoir. Leur rôle plus modeste est tout tracé; ces appareils si minutieux dans leur construction et dans leur mode d'emploi ne donnent guère que des indications de détail qu'il ne faut pas cependant négliger; ils servent, en résumé, à relever en temps serein certaines variations de potentiel au niveau du sol pendant la nuit, le jour et selon les différentes saisons, ou bien encore à mesurer les diverses tensions d'un lieu à un autre.

Variations

A. VARIATIONS QUOTIDIENNES

Les variations diurnes et nocturnes ont été observées par tous les météorologistes depuis l'abbé Mazéas, ainsi que Priestley l'a fait remarquer dans une lettre qu'il écrivait au docteur Hales : « Dans les nuits les plus sèches de cet été, il n'aperçut dans l'air aucun signe d'électricité, mais elle revenait le matin quand le soleil commençait à paraître sur l'horizon et cessait le soir environ une demi-heure après le soleil couché (1) ». Le Monnier (2) avait déjà noté cette fluctuation en septembre 1752 et elle fut plus exactement déterminée par le P. Beccaria dans son ouvrage « *Elettricita terrestre atmospherica* ». Le docteur Gardini confirma dans la suite ces observations. Mais celles de Saussure sont plus nettes et plus affirmatives. Il fut en outre le premier à dénoncer deux variations périodiques au lieu d'une en vingt-quatre heures. Le potentiel, très faible avant le lever du soleil, augmente et parvient à un maximum quelques heures après l'apparition de l'astre, puis il diminue, atteint un minimum quelques heures avant le coucher du soleil, et une seconde variation recommence. Le potentiel augmente, arrive à un deuxième maximum quelques heures après le coucher du soleil et diminue jusqu'à l'aurore pour recommencer à croître.

Les tableaux suivants donnent les heures exactes de ces variations, puisqu'ils concordent tous.

(1) Priestley, *Histoire de l'Électricité*, T. II, p. 223.
(2) *Mémoires de l'Acad. Roy. des Sciences de Paris*, 1752, p. 241.

En 1812, M. Schubler nota à l'observatoire de Stuttgart :

1er Minimum à 4 h. du matin
1er Maximum à 8 h. —
2e Minimum à 5 h. du soir
2e Maximum à 8 h. —

Il fait remarquer de plus que les maxima présentent de légères différences selon le mois de l'année. Ainsi, en juin, ils se sont montrés à 7 h. du matin et à 9 h. 1/2 du soir, tandis qu'à la fin de juin, on les relevait à 6 h. du matin et à 10 h. du soir.

En Juillet.	Maxima	à 7 h.	du m. et	9 h.	du s.
Août.	—	à 8 h.	— et	8 h. 1/2	—
Septembre.	—	à 8 h. 1/2	— et	7 h. 1/2	—
Octobre.	—	à 7 h.	— et	7 h.	—
Novembre.	—	à 9 h.	— et	6 h.	—

Arago, en 1830, observa à Paris le premier minimum à 7 h. 20 du matin et le premier maximum à 9 h.

En 1883, M. Dufour, opérant avec l'électromètre de M. Mascart, au laboratoire de l'Académie de Lausanne, trouva :

1er Minimum entre 3 et 5 h. du matin
1er Maximum à 7 h. —
2e Minimum entre 3 et 4 h. du soir
2e Maximum à 9 h. —

MM. Antonio Roïti et Pasqualini obtinrent en 1884 avec l'appareil de M. Mascart modifié :

1er Minimum à 3 h. du matin
1er Maximum à 8 h. 3/4 —

2e Minimum à 3 h. 1/2 du soir
2e Maximum à 8 h. 3/4 —

Quételet, à Bruxelles, avait donné les mêmes résultats, ainsi que M. Ragona, directeur de l'observatoire de Modène.

M. Birt, de l'observatoire de Kew, conclut de ses expériences que la tension minima de l'électricité atmosphérique est à peu près vers 2 h. du matin ; elle augmente jusqu'à 6 h., puis devient double à 8 h. de ce qu'elle était à 6 h. L'accroissement est alors plus gradué jusqu'à 10 h., c'est le maximum diurne. Le potentiel décroît ensuite jusqu'à 4 h. et présente alors un deuxième minimum qui est un peu supérieur au premier; il augmente enfin jusqu'à 8 h. du soir, et ce second maximum est notablement plus élevé que celui du matin. Puis, entre 10 h. et minuit, la tension diminue jusqu'à 2 h. (1).

Enfin le P. Denza, opérant avec l'électromètre de M. Palmieri et l'électroscope de Bohnenberger à l'observatoire de Moncalieri, trouve que l'électricité atmosphérique présente au Piémont deux maxima principaux qui succèdent de quelques heures au lever et au coucher du soleil. Ces deux maxima sont séparés par un minimum. Il en conclut que le développement de l'électricité atmosphérique dépend de l'action combinée de la vapeur d'eau et de la chaleur du soleil (2).

Il est facile de voir, dès maintenant, que l'évaporation produite par les rayons solaires est la cause principale de ces variations, surtout si l'on a remarqué les retards des maxima indiqués par Schubler.

(1) *Archives des Sciences physiques*, T. XII, p. 224.
(2) *Comptes rendus de l'Académie des Sciences* pour 1879, T. II, p. 153.

L'abbé Hervieu qui, en 1789, dans une lettre à M. de Metterie inscrite au *Journal de Physique*, s'était déjà hasardé à émettre quelques conjectures sur l'existence de ce mouvement périodique, le compare en 1835 à une sorte de flux et de reflux allant de l'équateur au pôle et du pôle à l'équateur. D'après lui, la cause de cette circulation se trouve dans la chaleur qui, par sa diminution ou son augmentation, modifie le sens du courant électrique (1). Le soleil étant un centre d'action répulsive sur l'électricité, celle-ci va de l'équateur au pôle le jour, et la nuit du pôle à l'équateur. M. Hervieu fait remarquer que le soleil, en outre de son mouvement journalier, décrit un cercle qui coupe l'équateur sous un angle d'environ 23° 1/2 ; le flux électrique doit par suite n'être plus le même, lorsque le soleil agit sur le tropique du Cancer ou sur celui du Capricorne.

Becquerel donne à ce sujet des explications plus détaillées qui complètent celles de l'abbé Hervieu : « Vers la fin de la nuit, l'électricité doit avoir une très faible intensité parce que l'humidité de la soirée précédente et celle de la nuit qui l'a suivie ont transmis à la terre une partie de celle qui s'était accumulée dans l'air ; quand le soleil commence à réchauffer la terre, les vapeurs s'élèvent et portent l'électricité positive dans l'air, dès lors l'électricité aérienne doit augmenter. Quand le soleil est parvenu à un certain degré d'élévation, la chaleur augmente, l'air se dessèche et ne transmet qu'avec peine le fluide électrique accumulé dans le haut de l'atmosphère. Il en résulte que les appareils électriques situés près de la surface de la terre indiquent une diminution d'électricité, bien que le fluide

(1) *Essai sur l'Electricité atmosphérique.* Abbé Hervieu.

électrique ne cesse point de s'accumuler dans les régions élevées. Le soleil s'approchant de la fin de sa carrière, l'air se refroidit, devient humide et commence à transmettre plus abondamment à la terre le fluide électrique accumulé dans les hautes régions (1). »

Jusqu'ici les météorologistes étaient d'accord pour reconnaître 2 maxima et 2 minima dans le potentiel atmosphérique. M. Mascart fait exception à cette règle et déclare n'avoir pu en observer qu'un seul. « Dans l'état moyen, dit-il, le potentiel de l'air toujours positif est beaucoup plus élevé et plus uniforme la nuit que le jour ; de 9 heures du soir à 3 heures du matin, il varie peu ; il baisse au lever du jour, prend une valeur minimum vers 3 heures de l'après-midi, se relève ensuite rapidement et atteint son maximum vers 9 heures. Il n'y a donc qu'un minimum pendant le jour et un maximum presque constant dans une partie de la nuit, c'est-à-dire une seule période diurne, au moins quand on envisage le terme le plus important du phénomène (2). »

Il ne nie pas que ces observations sont en contradiction avec celles généralement admises, mais il croit que les variations du potentiel observées pendant la nuit sont dues à des déperditions de fluide occasionnées par le mauvais isolement des électromètres. Il est vrai que M. Palmieri, qui croit aux deux maxima et minima diurnes et nocturnes, adresse le même reproche à M. Mascart quand il lui dit que son système de filet liquide descendant ne peut donner des résultats exacts et que d'ailleurs les observations faites à l'aide d'appareils enregistreurs doivent être considérées comme dépourvues de valeur scientifique :

(1) Becquerel, *Traité d'Electricité*. T. IV, p. 101.
(2) *Comptes rendus de l'Acad. des Sciences* pour 1880, T. II, p. 158.

« c'est peut-être pour cela, dit-il, que M. Mascart n'a pas vu les deux maxima diurnes qui, dans les journées régulières, ne font jamais défaut (1). »

M. Palmieri ajoute encore à ces détails d'observations ; il nous apprend que le dernier maximum est généralement plus fort et se prolonge dans la nuit ; quant à l'heure du minimum diurne, elle est plus variable, elle est changée par un vent qui souffle, un nuage qui apparaît à l'horizon, un brouillard venant de la mer : « ou pour toute autre cause qu'il n'est pas toujours facile de déterminer. » De plus, « les maxima et minima de deux journées consécutives et en apparence semblables ont des valeurs très différentes, et l'on peut assurer d'une manière générale que quand on observe de très forts maxima, le ciel est rarement serein dans les journées suivantes. On peut en dire autant si ces maxima s'écartent trop des heures habituelles avec une intensité exceptionnelle (2). »

En résumé, quand l'électromètre indique un potentiel élevé, la tension atmosphérique est très faible dans les régions élevées ; si l'électromètre n'accuse qu'une faible tension, l'atmosphère est saturée d'électricité mais l'air sec et chauffé par les rayons solaires ne la laisse pas s'écouler dans le sol. On voit donc que ces variations ne sont pas en réalité celles du potentiel de l'atmosphère en général, mais qu'elles indiquent seulement quelques-uns des changements de conductibilité atmosphérique, ce qui est bien différent.

(1) *Lois et Origines de l'Elect. Atmosph.*, Luigi Palmieri, p. 10.
(2) *Idem*, p. 31.

B. VARIATIONS ANNUELLES

Les mêmes causes influent sur l'électricité de l'atmosphère pendant l'hiver et l'été et produisent des fluctuations semblables. Quetelet reconnut, à l'aide de l'électromètre de Peltier, que l'électricité atmosphérique, considérée d'une manière générale, atteint son maximum en janvier puis décroît progressivement jusqu'au mois de juin qui présente un minimum d'intensité ; elle augmente les mois suivants jusqu'à la fin de l'année (1). D'après ses observations, l'électricité en janvier serait treize fois plus forte qu'en juin.

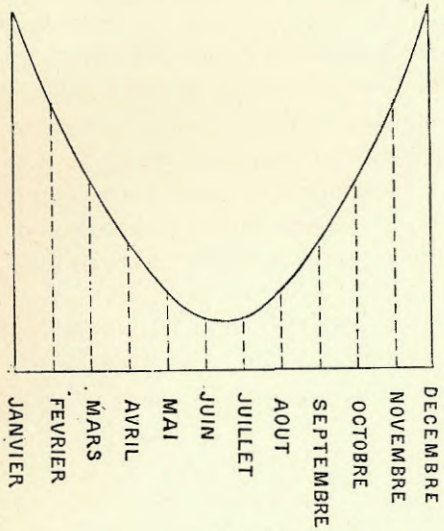

Fig. 14

MM. Roïti et Pasqualini ont trouvé les mêmes résultats et résument leurs calculs par le graphique ci-contre (fig. 14) (2).

Selon le R. P. J. Denza, les variations annuelles du potentiel électrique de l'atmosphère ne seraient pas aussi régulières. Il place le maximum en février et le minimum en

(1) *Annuaire Météorologique de France*, 1850, p. 167.
(2) *Osservazione continue della Ellettric Atm. Antonio Roïti.*

septembre. Mais il fait remarquer que durant les mois d'été la tension moyenne est oscillante à cause des orages qui altèrent le cours régulier de l'électricité, car, dit-il, « en réalité le minimum devrait tomber en été entre les mois de juillet et d'août. Après le mois de septembre, la valeur moyenne de l'électricité va toujours croissant, d'abord lentement, puis rapidement jusqu'en février » ; et il ajoute : « on ne peut en déduire aucune loi certaine des moyennes annuelles (1). »

Quoi qu'il en soit, ce qui a été dit pour les variations diurnes et nocturnes peut se répéter pour les saisons. Plus la conductibilité de l'air est grande, plus l'électricité s'écoule par ces couches humides et vient impressionner les électromètres et indiquer un potentiel plus grand ; tandis que, durant l'été, la saison des orages, l'électricité accumulée en des points déterminés dans les hautes régions et isolée de la surface du sol n'y arrive qu'accidentellement par des décharges brusques dont la violence est sans action sur des appareils extra-sensibles

C. VARIATIONS SUIVANT L'ÉTAT DU CIEL

Les variations régulières que subit le potentiel électrique de l'atmosphère pendant les différentes saisons, les maxima et minima diurnes ou nocturnes, ont été déterminés par des observations faites en temps serein. Il est évident que dans ces circonstances particulières seules on peut obtenir des résultats à peu près exacts. Mais survient-il des nuages, quelle que soit leur forme, leur composition, tout est modifié ; il n'y a plus de règles et il ne faut pas chercher à fixer

(1) *Comptes rendus de l'Acad. des Sciences* pour 1879. T. II, p. 153.

l'heure et le nombre, déjà contestés en temps serein, des minima et des maxima. Les variations, les écarts s'accentuent, ne présentent plus rien de périodique, et le potentiel est modifié suivant la composition des nuages en formation.

Tous les météorologistes sont d'accord pour l'affirmer et on peut les citer au hasard. Quételet nous dit que : « la différence entre les maxima et les minima est beaucoup plus sensible par les temps sereins que par les temps couverts »; Becquerel, répondant à une hypothèse dans laquelle Schubler assimile ces variations aux mouvements de l'aiguille aimantée, affirme que « les causes qui font varier l'électricité atmosphérique quand le ciel n'est pas serein sont si fugitives, qu'il est permis de croire qu'elles résultent de la présence du soleil sur l'horizon (1). »

Enfin MM. Palmieri et Mascart nous assurent que rien n'est régulier dans les variations périodiques par un ciel couvert.

Mais s'il est impossible de fixer les périodes et les fluctuations de la tension atmosphérique, on doit néanmoins se rendre compte de l'influence des nuages sur l'électricité de l'atmosphère et examiner les changements qui se présentent à l'apparition des vapeurs, rechercher, en un mot, s'il y a augmentation ou diminution du potentiel.

Pour résoudre cette question, il faudra, tout en acceptant les résultats des électromètres, se rappeler l'unité des lois auxquelles l'électricité doit toujours obéir et faire concorder les observations avec ces règles invariables dont l'exactitude sera pour nous un moyen de vérification et de contrôle.

C'est pourquoi il nous sera possible d'affirmer d'abord que le potentiel électrique augmente par un ciel nuageux ;

(1) Becquerel. *Traité d'électricité*, T. IV, p. 104.

et, très souvent, les instruments noteront la présence d'une plus grande quantité de fluide. C'est ce que Le Monnier observa dans l'expérience qui lui permit de conclure à la présence de l'électricité dans l'atmosphère en l'absence d'orages. Le P. Beccaria avait remarqué qu'en temps serein son appareil ne donnait que par intervalle des signes d'électricité, tandis qu'il en accusait presque toujours par temps couvert ; l'abbé Bertholon, Saussure, enfin de nombreux météorologistes l'ont également observé.

Cependant, d'un autre côté, le P. Beccaria avait aussi trouvé que « par un temps clair et venteux et quand le ciel était couvert de nuages séparés et noirs qui avaient un mouvement lent, il y avait peu ou pas d'électricité (1) ».

Quételet nous dit de plus : « Pendant les différents mois de l'année, l'électricité de l'air a été plus forte par un ciel serein que par un temps couvert, excepté vers les mois de juin et de juillet où l'électricité atteint son maximum, dont la valeur est à peu près la même, quel que soit l'état du ciel. Puis, à partir de cette époque, l'électricité de l'air, par un ciel serein, surpasse d'autant plus l'électricité observée par un ciel couvert, qu'on se rapproche davantage de janvier, et, dans ce dernier mois, le rapport est de plus de 4 à 1 (2). » De même, d'après M. Palmieri, l'électricité par un ciel nuageux est moins forte, plus variable, et sans période diurne bien définie. M. Mascart enfin trouve, par un temps couvert, une diminution de potentiel.

Cette contradiction entre les observations n'est qu'apparente. En effet, pendant l'hiver, l'humidité de l'atmosphère et par suite sa conductibilité étant très grande, les instruments exposés accuseront, comme nous l'avons déjà dit, un

(1) *Lettere dell' Ellettricismo* p. 166.
(2) *Annuaire météorol. de France*, 1850, p. 167.

potentiel très élevé, puisqu'ils seront fortement impressionnés. Mais, s'il survient une condensation des vapeurs, si le ciel devient nuageux, l'électricité atmosphérique s'y accumulera et l'électricité des appareils diminuera d'intensité, quoique en réalité le potentiel de l'atmosphère ait augmenté par suite de cette condensation.

Remarquons, en passant, que cette diminution de tension dans les appareils semble indiquer que l'électricité atmosphérique vient les impressionner par le contact et non par induction ; car, dans ce dernier cas, des nuages à potentiel élevé développeraient par influence, dans les couches basses, une plus grande quantité d'électricité, et c'est le contraire qui se produit.

Pendant l'été, la condensation des vapeurs est moins rapide et l'air ne devient jamais conducteur sur une grande surface, c'est pourquoi les électromètres varient peu quel que soit l'état du ciel. On a ainsi l'explication des remarques de Quételet.

En général, si des vapeurs s'interposent entre le soleil, cause des variations diurnes et nocturnes et les couches inférieures, c'est-à-dire le sol, on conçoit que les maxima ou les minima ne se fassent plus sentir dans les électromètres. Ces vapeurs, au contraire, forment une sorte de condensateur, l'électricité des hautes régions s'y accumule et les électromètres accusent en temps ordinaire une tension moindre.

En résumé, d'après tout ce qui précède et en s'appuyant même sur la proposition soutenue par M. Palmieri, que la condensation des vapeurs doit être considérée comme la cause principale de formation de l'électricité atmosphérique, on peut répéter que le potentiel électrique de l'atmosphère augmente par temps couvert dans les régions nuageuses.

Cela est si vrai que, lors de la formation des brouillards, les appareils indiquent une tension électrique très élevée. Or on sait que les brouillards résultent en général de la condensation des vapeurs à la surface du sol, seule différence importante qui les distingue des nuages. Par suite, les déviations considérables que subissent les électromètres à l'apparition des brouillards démontrent clairement qu'il en serait de même si les observations avaient lieu au milieu des nuages.

Cette élévation du potentiel par temps de brouillard fut remarquée pour la première fois par Bertholon. Puis Saussure obtint à Genève une tension considérable « par un de ces brouillards qui ne se résolvent pas en pluie et qui n'occupent pas une grande hauteur au-dessus du sol (1) ». Dans ce cas, dit M. Becquerel, il est permis de supposer que les globules vésiculaires servent de conducteur pour transmettre à la terre l'électricité de l'air serein situé au-dessus des brouillards (2). M. Wipples, directeur de l'observatoire de Kew, trouva de même en 1880 que les brouillards élèvent fortement le potentiel de l'atmosphère (3). M. Palmieri observa le même fait et il dit à ce sujet (4) : « Le 7 décembre dernier, le ciel restant parfaitement clair, un léger brouillard que l'on apercevait depuis quelques instants sur la mer s'étendit sur la ville vers onze heures du matin et devint de plus en plus épais. J'élevai comme d'habitude le conducteur mobile et l'électromètre dévia de plus de 90°, déviation que l'on ne cons-

(1) *Voyage dans les Alpes*, T. II, p. 221.
(2) Becquerel, *Traité d'Électricité*, T. IV, p. 102.
(3) *Annuaire météorologique de France*. — 1883, p. 99.
(4) *Rev. Intern. de l'Élec.*, T. V, p. 23 — et *Académie Royale des sciences de Naples*, 11 déc. 1886.

tate guère sans la chute de la pluie ». La pluie étant survenue le soir du même jour, M. Palmieri en conclut que ce fait est une confirmation de sa théorie, à savoir que les fortes tensions électriques observées par un ciel serein annoncent la venue prochaine de la pluie. Cela semble quelque peu détourner l'expérience au profit d'une autre thèse.

Citons encore une dernière observation qui a bien son poids, celle des guetteurs de sémaphore : ils savent fort bien que, suivant leur expression pittoresque, « les brouillards mangent l'orage »; c'est-à-dire que l'écoulement du fluide se fait silencieusement par leur intermédiaire. Qu'il nous suffise de remarquer que ces résultats confirment ce que nous avons dit plus haut sur l'augmentation du potentiel par temps couvert.

Si les vapeurs arrivent à leur maximum de condensation et tombent en pluie, l'électricité accumulée dans ces vapeurs trouve un conducteur et un courant électrique s'établit, pour ainsi dire, entre le nuage et la terre. Rappelons-nous les expériences de Le Monnier et nous verrons dans son rapport qu'il constate la présence de l'électricité la plus forte avant et surtout « pendant les chutes de grosses pluies. » Non seulement le P. Beccaria rapporte cette observation, mais il fait de plus dériver la pluie de l'électricité et, selon lui, la pluie sera proportionnelle à la quantité d'électricité contenue dans le nuage. Quételet se résume ainsi : « L'électricité atmosphérique augmente à mesure que s'accroît l'humidité relative et atteint son maximum à la chute de la pluie, de la grêle ou de la neige (1) ». Il n'y a d'ailleurs aucune contradiction à ce sujet et tous nos météorologistes sont d'accord sur ce point. M. Palmieri cons-

(1) *Instruction sur l'élect. atmosphérique*, Quételet — 1850.

tate, comme ses prédécesseurs, que l'électricité augmente d'une façon extraordinaire pendant que la pluie tombe, croît proportionnellement à la force de l'averse et diminue avec elle. Mais, contrairement à l'opinion du P. Beccaria, M. Palmieri, d'accord avec M. Colladon, voit dans la pluie une source constante d'électricité.

Signe de l'électricité atmosphérique

Quant au signe de l'électricité atmosphérique, il est généralement positif en temps serein. Les premiers météorologistes avaient remarqué cette particularité, mais sans y attacher une grande importance. Kinnersley, opérant avec un cerf-volant dont la ficelle était garnie dans toute sa longueur d'un fil d'archal, nous dit : « J'ai essayé deux fois cette expérience, l'air étant aussi sec qu'il soit possible de l'avoir et si clair qu'on n'y apercevait pas un nuage, et j'ai trouvé chaque fois la ficelle un peu électrisée positivement (1). » Actuellement on note plus soigneusement les changements de signe et M. Hirt fait remarquer qu'à l'observatoire de Kew, des 15,170 observations faites en 5 ans, 14,515 sont relatives à l'électricité positive et 655 à l'électricité négative. M. Mascart trouve aussi que le potentiel est le plus souvent positif quand le ciel est pur : « Par des temps couverts, le potentiel diminue, présente des variations rapides et se montre de temps en temps négatif... La pluie donne presque toujours de grandes déviations négatives; l'approche d'un orage se traduit le plus souvent par une grande variation suivie d'oscillations

(1) *Transactions philosophiques*, T. LIII, p. 87. — Lettre deuxième de M. Kinnersley à M. B. Franklin, *Œuvres de Franklin*, T. I, p. 205.

dans les deux sens avec une prédominance marquée de potentiel négatif (1). » Les pluies positives, d'après M. Mascart, sont extrêmement rares et ne paraissent jamais se produire en dehors des temps d'orage. C'est la confirmation des expériences d'Arago, qui fut un des premiers à noter ces changements fréquents du signe de l'électricité atmosphérique par temps nuageux ou orageux.

M. Palmieri a mis une restriction à cette électricité positive qui se manifeste en temps serein : il ajoute « pourvu que dans un certain rayon, pouvant aller jusqu'à 70 *km.*, il ne tombe ni pluie, ni neige, ni grêle ». Dans ce cas, il y a évidemment une induction exercée à cette distance du lieu des observations, c'est pourquoi on y notera de l'électricité négative. Pour M. Palmieri, il en sera de même si le ciel est nuageux et enfin si les nuages se résolvent en pluie ; l'observateur italien se sépare de M. Mascart et énonce la loi suivante qu'il a vérifiée maintes fois : là où tombe la pluie, on trouve de fortes traces d'électricité positive qui est entourée d'une zone plus ou moins étendue d'électricité négative à laquelle succède une nouvelle zone positive qui va en diminuant à une certaine distance. Puis il ajoute comme corollaire à cette loi : si l'on remarque de l'électricité négative sur le lieu des observations, c'est la preuve qu'à une certaine distance il tombe une autre pluie beaucoup plus forte qui développe, par suite, de l'électricité négative l'emportant sur l'électricité positive due à la pluie locale. M. Palmieri en déduit une dernière loi qui aiderait à prévoir certains changements du temps, à savoir : que si on note de l'électricité négative par un ciel clair, il devra pleuvoir à courte échéance. Le P. Beccaria avait déjà

(1) *Comptes rendus de l'Acad. des Sciences* pour 1880, T. II, p. 158.

trouvé la proposition inverse et il écrivait au P. Cecca, son collaborateur, que quand la pluie cessait avec une forte électricité positive, le temps serait beau pendant plusieurs jours.

Malgré ces résultats, nous croyons qu'il est très difficile de déterminer toujours d'une façon rigoureuse le signe de l'électricité atmosphérique ; c'est là une de ces nombreuses imperfections des électromètres qui nous laissent souvent dans l'indécision, malgré l'apparente exactitude de leurs résultats. Comme nous l'avons déjà dit, il est complètement impossible de noter toutes les circonstances particulières et uniques que l'atmosphère présente à chaque instant et qui modifient la tension et le signe de l'électricité. Il en résulte que la loi de M. Palmieri qui peut recevoir, il est vrai, de fréquentes vérifications, est loin d'être constamment applicable et ne peut guère, par suite, être appelée une loi. Il y a, par exemple, certainement une distinction à faire suivant qu'il s'agit d'une chute de pluie ou d'une tourmente de neige ou de grêle. En effet, d'une part, la conductibilité électrique de la pluie semble devoir être difficilement mise en doute, et quand bien même les résultats précédents n'en auraient pas démontré la complète évidence, nous n'aurions qu'à nous appuyer sur les lois universellement connues de l'électricité. De plus, les statistiques nombreuses, dressées pour vérifier les quantités de pluie tombées dans certaines régions, concordent suffisamment avec les chiffres indiquant à ces mêmes endroits les variations de la tension électrique pour convaincre tout le monde des relations étroites qui existent entre ces deux sortes de faits intimement liés et dérivant l'un de l'autre.

D'autre part, la neige et la glace sont classées parmi les corps isolants. On sait que Achard à Berlin électrisait un

conducteur par la rotation d'un bloc de glace (1), et suivant Luvini (2) la neige est si peu conductrice que les directeurs de l'observatoire de Sentis, dans le canton d'Appenzell, mis en communication avec le petit village de Schwendi, ont posé le fil à nu sur la neige et ont pu assurer ainsi le service d'hiver. Citons encore les particularités remarquées par M. Colladon à Genève : des grains de grésil électrisés conservaient leur charge en tombant et éprouvaient une répulsion lorsqu'ils arrivaient au contact d'autres grains de grésil tombés et semblablement électrisés. Le même fait fut observé à Orléans sur des grêlons ; enfin à Cherbourg, M. Delamare, pendant une averse de neige, vit des étincelles jaillir des ferrures de son parapluie au contact des particules neigeuses, et il ressentit des commotions légères (3).

On ne peut donc concevoir que deux phénomènes aussi distincts que la pluie et la neige puissent produire la même réaction et dans le même sens alors que leur conductibilité est toute différente et que, pour ainsi dire, les choses paraissent se passer inversement. Il est possible qu'une chute de pluie établisse un courant d'électricité positive par exemple, entre l'atmosphère et le sol, et développe à une distance donnée une quantité proportionnelle d'électricité négative. Mais quand il s'agit de neige, de grésil ou de grêle, l'assimilation semble difficile ; car si un corps frotté se charge d'électricité positive, le corps qui frotte prend l'électricité de signe contraire et, dans ce dernier cas, ce sera l'air sec et froid frotté contre les particules neigeuses ou les grêlons

(1) Cavallo, *A Complete treatise of Electricity*, London, 1778, p. 403.
(2) Luvini, *Etude sur l'Elect. Atm.*, 1884, Turin, p. 150, et *Mondes* 23 février 1884.
(3) *Comptes rendus de l'Académie des Sciences* pour 1879, T. II.

qui sera négatif, tandis que l'électricité développée à une certaine distance prendra le signe positif, c'est-à-dire qu'elle sera de signe contraire.

Potentiel de l'Électricité Atmosphérique

Déterminer la tension électrique de l'atmosphère est encore un problème plus difficile à résoudre que d'en désigner le signe et les variations. Dans la séance du 3 septembre 1887 de l'Académie des sciences de Naples, M. Palmieri présentait un rapport à ce sujet ; il conclut en ces termes : « Il convient cependant de bien se persuader que quelque moyen que l'on emploie à l'avenir, on n'arrivera jamais à mesurer la quantité d'électricité ou le potentiel de l'atmosphère, celui que l'on mesure est l'intensité de l'influence qui dérive d'une électricité inductrice dont on ne connaît pas l'altitude. En supposant la même altitude, les intensités induites dans un lieu donné dépendront de l'électricité inductrice et, étant données les mêmes intensités que les précédentes, elles dépendront de la distance (1). » Il n'est même guère probable que l'on puisse avoir des résultats exacts qui représentent le potentiel de l'électricité induite en acceptant les propositions de M. Palmieri, car il faudrait faire abstraction de toutes les perturbations atmosphériques qui modifient cette induction et des pertes nécessaires subies dans les observations, quel que soit le mode de calcul.

Déjà sir W. Thomson, dans une des séances de la Commission internationale des unités électriques, avait signalé

(1) *Rev. Intern. d'Electricité*, T. VI, 1888, p. 300.

l'intérêt qu'il y aurait à déterminer le potentiel des couches inférieures de l'atmosphère dans un volume limité de gaz emprunté à l'air. M. Mascart répondit en proposant de mesurer le potentiel dans une salle de quelques mètres dont les parois seraient formées par un grillage métallique à larges mailles, en communication avec le sol, afin d'éliminer l'action des masses électriques extérieures. Les échanges de gaz avec l'atmosphère suffiraient pour compenser la perte produite par les parois et par l'appareil collecteur (1). M. Palmieri a cru trouver un mode exact de vérification en graduant un électromètre avec des éléments cuivre-zinc; il n'est guère arrivé qu'à la conclusion citée plus haut.

En octobre 1883, la même vérification avait été faite à l'observatoire d'Odessa avec l'appareil de M. Mascart, et le directeur, M. Klossofsky, obtint un potentiel moyen de 270 éléments. « En décembre, dit-il, la tension s'est élevée jusqu'à 1,500 éléments. Le 16 janvier de l'année 1884, sous un ciel sans nuages, un léger brouillard et une température assez basse, l'aiguille marquait 820 divisions de l'échelle, ce qui équivaut à 24,600 éléments en supposant une proportionnalité entre les indications de l'échelle et le potentiel; le 19 janvier, par un temps couvert et froid, l'aiguille, durant 3 minutes, marquait au-delà de l'échelle, ce qui équivaut à une tension de plusieurs milliers d'éléments (2) ». Mais, de même que ses prédécesseurs, M. Klossofsky reconnaît que cette étude se complique à cause d'une très grande variabilité de la tension; cependant, il fait remarquer qu'il existe des rapports intimes entre la marche de la pression atmosphérique et les changements du potentiel électrique, et que les appareils enregistreurs seuls lui ont

(1) *Comptes rendus de l'Acad. des Sciences* pour 1882, T. II, p. 917.
(2) *La Nature*, 1886, T. II, p. 230.

permis, malgré les fortes oscillations et les différences brusques de potentiel, de suivre à grands traits les mouvements généraux de la tension atmosphérique.

Quoique cette conclusion soit quelque peu hasardée, il n'en faut pas moins constater que les résultats obtenus par M. Klossofsky vérifient les lois générales des variations suivant les saisons et selon l'état du ciel; il signale un maximum en janvier qui augmente par temps couvert et surtout avec du brouillard.

Enfin on a voulu représenter ce potentiel par des chiffres et l'énoncer en volts : la difficulté nous semble encore s'accroître, si cela est possible. Pour les décharges, dites *feux Saint-Elme* par exemple, on peut à peine concevoir la force électromotrice développée. Elle est littéralement incalculable, car s'il faut en croire la conclusion des expériences de M. A. Von Obermayer, la chute du potentiel nécessaire pour amener une décharge en aigrette, et qui croît avec la distance à laquelle se fait cette décharge, est approximativement de 160.000 volts pour un mètre de distance.

D'après M. Lephay, lieutenant de vaisseau, la tension atmosphérique se compense, au cap Horn, entre 50 et 70 volts (1). Le 24 novembre 1887, M. Abercromby observa à Ténériffe une tension de 549 volts.

M. le Dr Lecher rappelle aussi que les instruments de mesure des potentiels électrostatiques (l'électromètre et l'électroscope), ayant eux-mêmes le potentiel terrestre, ne peuvent déterminer le potentiel atmosphérique absolu mais seulement la différence de potentiel entre la terre et les couches de l'air. A cet effet, il faut placer au lieu de l'atmosphère dont on veut obtenir la tension des corps reliés à l'instrument de mesure.

(1) *Comptes rendus de l'Acad. des Sciences pour* 1884, T. I, p. 483.

Il recommande d'opérer en plaine puisque les montagnes, les maisons, les tours, etc..., ont une influence perturbatrice sur l'état des surfaces équipotentielles. Enfin, il cite les délicates expériences de M. Exner dont les calculs prouvent d'après lui : 1° que la chute du potentiel devient moindre lorsque l'air se charge davantage de vapeurs aqueuses, et réciproquement; 2° que le potentiel croît proportionnellement avec l'élévation; 3° que, dans les journées d'hiver claires et sèches, la chute du potentiel est d'environ 600 volts par mètre (1).

On ne peut évidemment accepter tous ces chiffres comme représentant la tension électrique de l'atmosphère; peut-on y voir une moyenne relative qui puisse servir à des études comparatives, et conduire de là à des mesures proportionnelles? Nous ne le croyons pas; car, étant donné que les déviations de l'aiguille d'un électromètre sont graduées au moyen de piles, ces déviations ne peuvent constamment être proportionnelles au nombre des éléments que si l'on exprime en volts la force électromotrice de ces batteries; les pertes s'accentueront par suite des variations de résistance et d'intensité et l'erreur, quelque minime qu'elle soit d'abord, augmentera dans de telles proportions qu'enfin il ne sera plus possible de l'apprécier.

En résumé, toutes ces recherches, on le voit clairement, n'ont eu pour résultat que d'obtenir le potentiel électrique à quelques mètres du niveau du sol et dans certains cas exceptionnels. On comprend d'ailleurs qu'il est impossible de se rendre compte, même approximativement, de la tension à laquelle est soumise l'électricité dans l'atmosphère. Il ne faut pas vouloir mesurer ce fluide qui commande à

(1) *Société électrotechnique* de Vienne. — Séance du 29 janvier 1890.

tous les phénomènes grandioses de la nature et dont les effets sont si terribles dès qu'il s'en produit la moindre condensation. Richmann l'avait essayé et sa mort nous rappelle au sentiment de l'impuissance humaine en face des grandes forces de la création.

Distribution géographique

Lorsque nous avons étudié les variations de tension que subit le potentiel électrique de l'atmosphère pendant le jour et la nuit, suivant les différentes saisons et selon l'état du ciel, qu'il soit serein ou couvert, il a été facile de remarquer que ces variations ont été relevées au moyen d'observations faites de tous côtés et que plusieurs régions ont fourni leur contingent de résultats qui se sont vérifiés mutuellement. Mais si ces variations sont à peu près partout proportionnelles, c'est-à-dire si l'on obtient toujours un maximum en hiver et un minimum en été, quelle que soit la latitude, la tension est loin d'être constante et varie au contraire selon les lieux et l'altitude. L'étude de cette question, qui vient nécessairement à l'esprit, complètera la première partie de ce travail et l'on conçoit même que l'entière résolution de cet important problème éclaircirait notablement l'ensemble des théories si difficiles à unifier sur les origines de l'électricité atmosphérique. Essayons donc de réunir et d'analyser les recherches nombreuses faites à ce sujet et nous pourrons peut-être alors pressentir les lois qui règlent la distribution de l'électricité à la surface de notre globe.

Il nous faut tout d'abord mettre à part les régions polaires où il est difficile de recueillir, à l'aide des électro-

mètres, quelque signe d'électricité. En 1825, Scoresby, malgré ses tentatives réitérées, ne put en découvrir la moindre trace (1), et lors de l'expédition française, en 1838, dans l'Altenfjord, au 70me degré de latitude nord, MM. Lottin et Bravais, avec un électromètre à pailles, n'obtinrent de faibles signes d'électricité positive qu'au moyen d'une flèche lancée en l'air; les déviations des pailles cessèrent à la hauteur du Cap Nord. Cependant un cerf-volant enlevé à une grande hauteur permit encore à M. Siljestrom de noter, en février et en mars, la présence d'électricité positive. Enfin, pendant l'expédition suédoise de 1868 au Spitzberg, M. Lemstrom essaya vainement de découvrir la moindre trace d'électricité à 80° de latitude N. (2).

M. Wijkander s'occupa, en 1872, de réunir toutes ces remarques. « Elles concordent en ceci, dit-il, que sous les latitudes en question et aux températures les plus hautes, l'air conduit l'électricité avec une facilité très grande, circonstance à laquelle on a attribué l'absence de tonnerre et la présence de l'aurore boréale. Divers savants ont cru pouvoir admettre que cela dépendait de l'humidité de l'air dans ces régions, mais la circonstance que d'autres causes y contribuent aussi est prouvée par ce fait que la même température et la même humidité n'exercent pas cette action à un si haut degré sous des latitudes inférieures (3). » Cela est évident et d'autres influences agissent ici pour produire un phénomène spécial : les aurores polaires.

Laissons donc de côté pour le moment les régions arctiques, et si nous revenons dans nos pays tempérés, nous remarquons d'abord que les endroits choisis comme observatoires, c'est-à-dire les lieux où les électromètres peuvent indiquer la présence du fluide, ne doivent pas être situés à une trop grande proximité des villes et des forêts. Becquerel a trouvé la tension électrique nulle sous les arbres et dans les maisons. « ... Elle est quelquefois sensible, dit-il, dans les villes, au milieu des grandes places et principalement sur les ponts (1). » Il est d'ailleurs inutile de multiplier les citations, cela ressort clairement des nombreuses indications fournies par tous les météorologistes ; chacun connaît ce qu'ils appellent un lieu bien exposé, c'est-à-dire éloigné de toute cause conductrice qui puisse influer de quelque manière que ce soit sur l'électricité atmosphérique, la modifier, l'absorber et par suite annuler les résultats des électromètres.

En effet, dans les villes, les milliers de pointes dressées plus ou moins verticalement, corniches, arêtes de toits, flèches, tuyaux de cheminées, paratonnerres, sont autant de conducteurs qui facilitent l'écoulement du fluide et rendent à peu près nulle la tension électrique de l'atmosphère environnante.

Il en est de même, jusqu'à un certain point, pour les forêts, principalement celles de bois résineux qui sont des conducteurs naturellement isolés, ce qui empêche de constater, à proximité, la présence de l'électricité.

M. Fautrat fit, en 1876, à Ermenonville, une suite d'observations sur l'état ozonométrique de l'air et il obtint avec le papier teinté de tournesol mi-ioduré les résultats suivants :

(1) *An Account of the Artic Regions.* — V. I, p. 282. Edinburgh, 1820.

(2) *Bulletin des travaux de l'Acad. Roy. des Sciences de Suède* pour 1869.

(3) *Bulletin des travaux de l'Acad. Roy. des Sciences de Suède* pour 1874.

(1) Becquerel. *Traité d'Electricité*, T. I, p. 531.

	Bois résineux.	Bois feuillus.
Sous bois.....	7,7	8,2
Hors du bois.....	8	8,8
Au-dessus des massifs..	8,4	8,8
En dehors.....	8,4	8,8

On voit qu'il faut faire certaines restrictions en ce qui concerne les forêts, car si les arbres paraissent avoir la même propriété conductrice que les pointes quant à la tension électrique observée en temps ordinaire, par des appareils sensibles exposés à peu de distance, il n'en est plus de même lorsqu'il s'agit de la distribution de l'électricité atmosphérique considérée à un point de vue plus général.

En effet, tandis que, suivant les statistiques, les orages violents sont peu fréquents dans les grandes villes et la tension électrique à peu près nulle, les forêts semblent au contraire, suivant Dilwyn, appeler le fluide électrique, en élever le potentiel et en déterminer la condensation : cela concorde d'ailleurs avec les remarques de M. Fautrat. C'est qu'un phénomène connexe se produit ici et les fonctions vitales des plantes, respiration, nutrition et croissance, ne s'accomplissent pas sans produire une quantité notable d'électricité. D'après Becquerel, il serait à supposer que cet écoulement constant du fluide vers l'atmosphère, surtout dans les parties de la surface terrestre où la végétation a le plus de puissance, doit être une des causes principales de ces violents troubles atmosphériques qui ébranlent les régions tropicales. Cette théorie, qui a de nombreux partisans, s'accorde parfaitement avec les observations de tensions électriques très élevées, faites en Amérique et dans le Sud Algérien.

On pourrait même intervertir la proposition et se demander si, dans ces pays où l'air chaud constitue un isolateur presque parfait, la présence constante de cette électricité n'aurait pas quelque influence sur l'existence d'une flore exubérante. Citons à l'appui de cette hypothèse un fait singulier relevé dans une lettre de l'abbé Toaldo à l'abbé Bertholon; il fait remarquer que le sénateur Quirini, ayant planté des jasmins près de sa maison, s'aperçut que deux de ces arbustes placés à l'endroit où la chaîne du paratonnerre s'enfonce en terre s'étaient élevés à une hauteur considérable, tandis que les autres, bien que semblablement exposés d'ailleurs, atteignaient des dimensions ordinaires. D'autres observations ont confirmé ce fait isolé.

A la suite d'expériences de M. Berthelot sur la fixation de l'azote par la terre végétale et de l'influence de l'électricité, M. A. Gautier rapporte qu'il voulut s'assurer en 1882 si l'influx électrique était capable d'exciter la végétation et comme conséquence d'aider peut-être à la fixation de l'azote par les plantes. Dans des vases à fleurs maintenus sous une veranda, il avait disposé un certain nombre de plants de haricots, luzerne, etc. Dans la terre de ces pots, aux deux extrémités d'un même diamètre, étaient noyés les deux pôles terminant un circuit formé par la réunion en série de 1 à 3 éléments thermo-électriques Noë (l'on sait que le courant de chacun de ces éléments vaut environ un Bunsen et qu'il est d'intensité sensiblement constante). Des vases semblables qui avaient reçu des plants de même espèce étaient placés côte à côte dans des conditions extérieures tout à fait identiques, si ce n'est qu'ils ne recevaient pas l'influence du courant à laquelle les premiers furent soumis pendant plusieurs mois. Les plants dont la terre était traversée par le courant électrique ont crû d'une façon

beaucoup plus rapide que les autres. Au bout de quatre à six semaines, ils avaient pris une vigueur de végétation excessive et représentaient, en volume et en poids, presque le double des plants non électrisés (1).

En tout cas, que l'électricité soit l'effet ou la cause de la végétation, il faut, pour expliquer le potentiel considérable relevé dans les contrées tropicales, tenir compte de la chaleur et surtout de la sécheresse de l'air, poussée à un degré extraordinaire pendant de longs mois ; de plus, la constitution géologique du sol n'est pas étrangère à ce phénomène et son degré de conductibilité ou d'isolement vient évidemment y contribuer pour une grande part. Toutes ces causes, comme on le voit, se relient entre elles et dérivent sans doute l'une de l'autre.

Quoi qu'il en soit, à latitude égale, cette tension s'élève beaucoup plus en Amérique qu'en Europe, et pendant les sécheresses hivernales ou estivales, l'électricité atteint un tel degré de condensation qu'elle donne lieu à des phénomènes visibles analogues à ceux dits *feux Saint-Elme* observés pendant les orages. Tous les corps terrestres parfaitement isolés se trouvent fortement électrisés et l'électricité animale vient encore ajouter à ces manifestations; Volney d'abord, puis le professeur Loomis en furent témoins et nous rapportent que le corps humain et les vêtements attirent les duvets et les poussières dont on ne peut se débarrasser qu'à l'aide d'éponges humides. Les cheveux se hérissent et se dressent d'autant plus qu'on les peigne ; les tapis chauffés d'un appartement craquent, et des étincelles en jaillissent si le pied les foule ; tous les objets métalliques deviennent de véritables excitateurs

(1) *Comptes Rendus de l'Acad. des Sciences*, juin 1889. — T. II. Séance du 19 août.

entre les mains de ceux qui les manient : toutes les pointes étincellent (1).

En Afrique, on relève souvent de semblables observations : Zurcher rapporte dans son *Traité sur les phénomènes de l'atmosphère* que, le 8 mai 1831, des officiers qui se promenaient tête nue sur la terrasse du fort de Bab-Azoun, à Alger, remarquèrent que plusieurs d'entre eux avaient les cheveux hérissés et surmontés de petites aigrettes lumineuses ; lorsqu'ils élevaient les mains, des aigrettes semblables se formaient aussitôt au bout des doigts. Dans le nord du Sahara, M. Amat vit, par des soirées chaudes, les poils de la queue des chevaux s'écarter et former une sorte d'éventail avec des crépitements et des étincelles qui se développaient sous la brosse et l'étrille (2). M. Amat fait justement observer que l'électricité doit plus s'accumuler dans le cheval que dans l'homme, car la corne des sabots devient un véritable isolateur.

Cependant, l'électricité peut être suffisamment développée chez l'homme pour constituer dans certains cas un vrai danger.

Sur les plateaux des Montagnes Rocheuses où règne une sécheresse presque constante, des ingénieurs qui faisaient percer un tunnel virent avec effroi plusieurs de leurs ouvriers tués ou blessés par l'explosion inattendue de cartouches de dynamite qu'ils transportaient ; on ne préserva les autres d'une mort certaine qu'en leur donnant des chaussures conductrices maintenues toujours humides afin de faciliter l'écoulement du fluide. Il est bien entendu qu'il ne s'agit pas ici du cas particulier observé par Arago, Girard..... sur certains individus dont la sécheresse du

(1) *Causeries Scientifiques*, de Parville, 1877.
(2) *Comptes Rendus de l'Acad. des Sciences* pour 1880, T. II, p. 446.

tégument porte l'électricité de leur corps à une tension exceptionnelle. Ce sont des phénomènes causés par l'état particulièrement sec de l'atmosphère ainsi que le fait remarquer M. Brown Sequard.

Dans les relations de son voyage en Perse, M. Dieulafoy parle de la sécheresse incroyable qui se remarque sur les plateaux Iraniens et il ajoute : « L'électricité règne en souveraine maîtresse. Lorsqu'il fait nuit, jetez sur le sol une épingle, une pièce de monnaie, il n'est besoin ni de briquet ni d'allumettes pour la retrouver. Prenez une feuille de papier, déchirez-la lentement, et la lueur qui accompagnera la dislocation des fibres jettera une vive clarté autour de vous. Un soir, en caravane, nous vîmes jaillir des gerbes d'étincelles du flanc de nos mulets. Nous crûmes d'abord être le jouet d'une hallucination. Descendant de cheval, nous nous approchâmes des bêtes de somme. Des milliers de crépitements accompagnaient des milliers d'escarboucles chaque fois que la queue de l'animal venait frapper quelque partie de son corps » (1).

Dans nos pays tempérés dont le climat est généralement humide, ces manifestations n'ont lieu que pendant les orages, alors que l'électricité de l'atmosphère est condensée en certains points déterminés. Par suite, pour obtenir des phénomènes analogues il faut aller chercher la sécheresse à de plus grandes altitudes ; de même qu'en Amérique, on retrouve ces fortes tensions sur les hauteurs des Andes, et en Afrique sur les plateaux algériens, si elles font défaut dans la plaine. De Saussure, Fournet... en citent de nombreux exemples observés par eux dans les montagnes du Jura et dans les Alpes sur les hauts sommets ; des étincelles

(1) *La Nature*, 1889, T. I, p. 327.

jaillissent des bâtons ferrés et quand on les enfonce dans la neige, on entend une sorte de bruissement et de bourdonnement continu que les guides connaissent sous le nom de « *chant des bâtons* » ; enfin la plupart des phénomènes électriques observés en temps de sécheresse en Amérique se renouvellent sur nos montagnes.

Il semble donc possible de résumer toutes ces observations en disant que l'électricité atmosphérique enveloppe la terre, et forme autour d'elle comme une sorte de deuxième sphère qui suit exactement les courbes de la première en les exagérant, puisqu'elle s'accumule aux pointes ; sa tension est donc extrêmement développée à l'équateur et presque nulle aux pôles.

Distribution suivant l'altitude

Pendant de longues années, le problème de la distribution de l'électricité suivant l'altitude fut considéré comme résolu et l'on concluait sans conteste à l'augmentation du potentiel, mais une scission s'est déclarée parmi les observateurs et s'est accentuée à mesure que les instruments de détails ont pris de l'importance ; plusieurs météorologistes, tout en étant d'accord pour assurer que la tension électrique varie bien selon l'altitude, se sont séparés de la croyance générale en déclarant au contraire que cette tension diminue à mesure que l'on s'élève ou du moins qu'il n'y a pas d'augmentation.

Le promoteur de cette théorie est M. Palmieri. Il présente comme preuve irrécusable ses expériences faites de concert avec le professeur Semmola à l'observatoire de Capodimonte, sur le clocher de Santa-Chiara, au fort St-Elme,

sur le môle St-Vincent. « Ayant comparé nos observations, dit-il, nous ne trouvâmes pas toujours que les tensions les plus fortes correspondaient aux plus hautes altitudes, car pendant le mois de juillet, vers 7 heures du matin, la plus haute tension était observée tout près du niveau de la mer qui à cet instant était couverte d'un léger brouillard. » Nous arrêterons ici cette citation pour faire remarquer que dans ce cas particulier de brouillard à la surface de la mer, il n'est nullement étonnant que le potentiel électrique ait été plus élevé près de ce brouillard qu'au dessus. Il est évident que lorsque les vapeurs sont condensées en un point quelconque, il n'y a plus rien de fixe et que le potentiel le plus considérable se trouve là où a lieu la condensation. M. Palmieri reconnaît bien que souvent on a relevé à de grandes hauteurs des tensions électriques plus fortes qu'aux stations inférieures mais il les explique de la manière suivante : Il suppose toujours que l'électricité recueillie par les électromètres est induite et que par suite il se forme au dessus de l'observateur, à une certaine hauteur, une zone inductrice possédant une humidité relative qui augmente avec les vapeurs arrivant du sol dans cette région plus froide, ou bien qu'il existe une superposition de courants aériens de températures différentes. M. Palmieri l'affirme d'après les observations d'aéronautes qui ont toujours rencontré en s'élevant une certaine zone relativement humide, qui tantôt se trouve presque voisine du sol et tantôt n'existe qu'à des altitudes supérieures à 1000 *m*. M. Palmieri conclut ainsi : « Quand cette zone inductrice est plus élevée, comme cela arrive principalement pendant les chaudes journées d'été, elle exerce évidemment une action plus forte en haut qu'en bas. Mais si par hasard un brouillard ou nuage se forme à proximité du sol, on aura encore

une nouvelle raison pour observer en bas de plus fortes indications (1). »

On voit, d'après ce que nous avons dit, que cette démonstration n'est pas décisive, car M. Palmieri envisage à un point de vue général le cas particulier de formation de brouillards ou de vapeurs qui augmentent sur un point spécial *seulement*, le potentiel électrique de l'atmosphère.

Pour la même raison, nous ne pouvons considérer comme concluantes les déductions du P. Denza tirées de ses seules expériences : « La comparaison des observations électriques de Moncalieri (259 *m*. au-dessus du niveau de la mer) avec celles du petit Saint-Bernard (2160 *m*.), où existe un autre électromètre bifilaire, donne jusqu'ici le résultat suivant : la tension électrique dans les conditions normales de l'atmosphère diminue avec l'altitude (2). »

Faut-il nécessairement adopter cette affirmation : le potentiel diminue avec l'altitude ? Non, nous ne le croyons pas quelles que soient l'exactitude des observations et la sensibilité des appareils. On peut en conclure qu'à tel endroit des courants atmosphériques à peu près constants se font sentir, qu'à tel autre la conductibilité électrique est meilleure ; qu'ici, près de la mer, le potentiel est plus élevé, etc. On peut en conclure tout ce qu'on voudra de particulier pour ces points, mais rien, absolument rien de général qui régisse l'atmosphère toute entière ; il ne nous semble pas possible d'établir des lois définitives d'après quelques expériences météorologiques faites en des points spéciaux. Lorsqu'il s'agit d'une force aussi capricieuse que l'électricité atmosphérique qui est répartie d'une manière si inégale

(1) *Acad. des Sciences de Naples* (Séance du 6 mars 1886), et *Rev. Intern. de l'Elect.*, T. II. p. 452.

(2) *Comptes Rendus de l'Acad. des Sciences* pour 1879, T. II, p. 153.

suivant les saisons, l'état du ciel, les pays, les climats, la configuration des terrains, leur composition, suivant les conditions de conductibilité et de condensation on ne peut rien affirmer, si ce n'est que les variations de l'atmosphère sont incessantes et que, par suite, son potentiel électrique noté en certains lieux ne peut servir de mesure absolue pour tous les autres.

Pour passer d'une observation particulière à une loi générale il faudrait que cette observation ait été répétée dans tous les pays ; il faudrait surtout que par des ascensions aérostatiques on se soit mis à l'abri de toutes les influences que le voisinage de la terre impose à nos appareils trop sensibles ; il faudrait que ces ascensions et ces expériences aient été renouvelées cent fois, mille fois... et encore il serait peut-être prudent de n'émettre que des hypothèses, hypothèses plus ou moins vraisemblables sans doute, mais qui s'imposeront d'autant plus qu'elles concorderont davantage avec les lois admises et vérifiées.

Si nous analysons les recherches des nombreux adversaires de MM. Palmieri et Denza, nous verrons que leurs assertions semblent mieux fondées, et d'ailleurs les phénomènes auxquels l'électricité atmosphérique donne lieu ne s'expliquent guère que si l'on admet l'accroissement de l'électricité avec l'altitude, proposition qui est devenue, nous osons le dire, une quasi-certitude.

Alors que la pensée d'étudier l'électricité atmosphérique dans ses plus petits détails n'était pas venue, n'avait pu encore venir à l'esprit des observateurs, faute de moyens pour se livrer à ces sortes de travaux, on acceptait les résultats des électromètres primitifs, mais seulement comme point de départ de théories ayant pour base, fermement assise, les principes immuables de l'électricité ; on s'élevait

de là par degrés jusqu'à rendre compte des grandes perturbations atmosphériques dont il fallait faire concorder les manifestations avec les principes posés. Il s'ensuit qu'une grande partie de ces observations ont conservé toute leur valeur ; ces systèmes qui n'étaient que le résultat de simples déductions sont restés encore les nôtres et nos savants météorologistes n'arrivent généralement avec tous leurs moyens d'action qu'à éclaircir et terminer les théories hardiment ébauchées par leurs prédécesseurs. C'est ainsi que pour étudier la distribution de l'électricité suivant l'altitude, nous remonterons jusqu'en 1756 : A cette époque Muschenbroek et le baron Van der Does font des expériences sur les montagnes sablonneuses de Noordwick à l'aide d'un cerf volant et ne relèvent de signes d'électricité qu'à 30 *m.* au dessus du sol (1). Quelques années plus tard, Kinnersley vérifie cette proposition et trouve, un peu au dessus du sol, une faible tension qui devient considérable à 150 toises (2). Puis, c'est Cavallo qui fait de nouvelles observations sur la coupole de St-Paul à Londres : il constate à cette hauteur une augmentation sensible d'électricité et il en conclut que si les choses se passent de la même manière à une certaine distance du sol, l'électricité des régions supérieures doit être extrêmement forte. Ces premières observations furent confirmées par celles de Bertholon, Beccaria, Volta, Saussure et par celles de Becquerel qui s'occupa spécialement de la question. Après avoir noté que l'électricité de l'air ne commence qu'à 3 ou 4 pieds au dessus du sol, Becquerel fait remarquer que la loi inconnue d'après laquelle l'électricité se distribue suivant l'altitude

(1) *Cours de Physique*, Muschenbroek, T. I, p. 394.
(2) *Philos. Trans.*, T. LIII, p. 87.

est modifiée par la formation des vapeurs. Désireux de déterminer cette loi, il se transporta avec Breschet au Mont Saint-Bernard. « Là, sur un des plateaux qui avoisinent l'hospice, par un temps parfaitement clair, nous avons tendu un morceau de taffetas gommé de 3 *m.* de long sur 2 *m.* de large sur lequel on a déroulé un fil de soie recouvert de clinquant de 80 *m.* de longueur. L'un des bouts de ce fil a été mis en communication avec la tige d'un électromètre à pailles au moyen d'un nœud coulant, serrant légèrement la tige, l'autre bout a été attaché au fer de lance d'une flèche, puis on a lancé celle-ci avec un arc fortement tendu. La flèche en s'élevant a emporté le fil qui étant faiblement attaché à la tige s'en est séparé aussitôt qu'il a été déroulé. Les pailles se sont écartées peu à peu à mesure que la flèche s'élevait et l'écartement a été bientôt tel que les pailles sont venues frapper fortement les parois de la cloche (1). »

Becquerel en conclut à l'existence d'électricité positive qui va augmentant d'intensité sur les hautes montagnes, depuis le sol jusqu'à 250 pieds. Comme mode de vérification, il lançait la flèche horizontalement, ce qui ne donnait aucun résultat et indiquait bien que ce frottement de l'air contre la flèche n'était pas la cause de l'électricité obtenue en dirigeant cette flèche verticalement.

Becquerel recommença ces observations au Mont-Dore et reconnut l'exactitude de ses premières déductions.

Ces expériences ne sont pas concluantes, il est vrai ; en effet, elles démontrent seulement, nous le répétons, que l'électricité s'accumule au sommet des hautes montagnes et comme le fait justement remarquer M. Palmieri, d'après les

(1) *Traité de physique*, Becquerel, T. IV, p. 110.

observations de Saussure, ce n'est pas de la hauteur absolue que dépend ici la plus forte tension, mais bien de la situation du lieu qui n'est dominé par aucun des corps environnants. Mais M. Palmieri ne peut s'appuyer non plus sur ce fait pour prouver que l'électricité n'augmente pas avec l'altitude.

Lors de la découverte des ballons, les savants profitèrent de ces nouvelles conditions d'expérimentation qui leur permettaient d'étudier à diverses hauteurs certains phénomènes physiques ou chimiques ; l'électricité ne fut pas oubliée. Le flamand Robertson y pensa le premier et après lui il nous faut citer plus particulièrement nos deux savants compatriotes Biot et Gay-Lussac. Au moyen d'un fil métallique de 80 *m.* de long, terminé par une sphère de cuivre et attaché à la nacelle de leur ballon, ils purent observer que l'électricité recueillie augmentait avec l'altitude et que la sécheresse lui était aussi proportionnelle ; ils allèrent ainsi jusqu'à la hauteur de 4000 *m.* Les aéronautes ont malheureusement abandonné de si intéressantes observations pour se livrer uniquement à l'étude d'une question problématique, la direction des aérostats ; à part les expériences peu concluantes de M. Marcillac avec son ballon *le Gabizos*, en novembre 1886, à Marseille, les ascensions n'ont eu qu'un but souvent très vague et en tout cas sans profit pour le sujet qui nous occupe. Aussi nous empressons-nous d'adopter les conclusions suivantes de M. Marcillac : « Il y a intérêt, dit-il, à approfondir et à examiner sous toutes ses faces la question de l'origine et de la distribution de l'électricité atmosphérique. Les physiciens qui se sont le plus spécialement occupés de ces recherches, MM. Colladon, Mascart, Palmieri, Thomson, pour n'en citer que quelques-uns, sont d'accord pour

reconnaître l'utilité des ascensions aérostatiques dans ce genre d'études. » (1)

C'est pourquoi M. Marcillac propose : 1° qu'il soit constitué le plus tôt possible une commission chargée d'étudier et d'arrêter un programme détaillé qui servira de guide et de règle dans les ascensions scientifiques en aérostat ;

2° La commission examinera et tiendra compte, s'il y a lieu, de toutes les communications et observations qui lui seraient adressées. Le programme, une fois fixé et publié la commission vérifierait les qualités et commodités spéciales des instruments à employer.

3° Il serait fait appel à la bonne volonté des aéronautes de tous pays afin d'obtenir leur concours dans ces ascensions dont les résultats seraient centralisés par la Société internationale des électriciens.

En attendant que ces projets se réalisent et viennent corroborer les théories ou hypothèses présentées, il est cependant facile, malgré l'ignorance dans laquelle les aéronautes nous ont laissés, de tirer de ces théories certaines conclusions irréfutables qui viennent à l'appui des premières observations faites par Saussure, Becquerel, Gay-Lussac... En effet, les partisans des courants descendants, c'est-à-dire du système de M. Faye sur l'origine des nuages orageux et la loi des tempêtes, s'appuient sur le principe de l'augmentation du potentiel électrique avec l'altitude et font venir des hautes régions de l'atmosphère le flux électrique qui, entraîné vers le sol dans un tourbillon descendant, provoque diverses perturbations. Admettre l'hypothèse de MM. Denza et Palmieri, ce serait supprimer la base et le principe de cette théorie et la détruire entièrement ;

(1) *Société internat. des Electriciens* (Séance du 2 février 1887, et *Rev. Intern. de l'Elect.*, T. IV, 1887, p. 298.

ce serait encore anéantir celle de M. Colladon, car il démontre, d'après ses multiples observations, que l'électricité des nuages vient des couches supérieures de l'atmosphère, aspirée par le vide momentané que produit la chute même de la pluie ou de la grêle. Si l'on suppose les courants ascendants, on doit encore en déduire l'accroissement du potentiel selon l'altitude, puisque l'électricité serait entraînée vers les hautes régions d'où elle se répandrait dans les espaces secs et raréfiés.

En résumé, on arrive toujours à la même conclusion qui rend seule possible les explications de la plupart des phénomènes et qui d'ailleurs est démontrée par la majorité des observations ; et pourtant nous n'avons pas cité le Dr Weber de Breslau : il affirme qu'en temps ordinaire, l'augmentation du potentiel doit être une fonction linéaire de la hauteur et il ajoute que autour de la terre s'étendent des surfaces équipotentielles successives qui sont parallèles et se rapprochent au-dessus des montagnes. Nous avions aussi oublié M. Edlund qui nous propose la même loi en la déclarant nécessaire, ...et une foule d'autres qu'il serait trop long de mentionner. On peut dire enfin que cet accroissement de potentiel est accepté désormais par tout le monde.

De plus, il semble que ce soit, en particulier, la seule raison plausible de la suspension des nuages dans l'atmosphère. Cette question souvent discutée ne peut, en effet, recevoir de solution complète et satisfaisante que si l'on consent à admettre l'électricité comme cause principale. M. Oltramare l'explique ainsi, bien qu'il pose des restrictions à l'accroissement constant du potentiel électrique (1).

(1) *Comptes rendus de l'Acad. des sciences,* pour 1879, T. I, p. 1265.

Il admet que les couches atmosphériques possèdent une électricité positive donnée par une fonction arbitraire de la hauteur, fonction qu'il suppose la même pour tous les différents points de la terre.

Pour calculer l'action de l'électricité atmosphérique sur une masse nuageuse positive, M. Oltramare considère une molécule de cette masse et fait passer par cette molécule une sphère concentrique à la terre de manière à diviser l'atmosphère en deux couches, une couche supérieure, croissante en potentiel et s'étendant jusqu'aux limites extrêmes et une couche inférieure descendant jusqu'au sol. Il en résulte que cette molécule soumise à la force de la couche inférieure sera soulevée par répulsion et que par suite si l'on envisage l'ensemble du nuage, la résultante de toutes ces forces sera la puissance capable de soutenir et d'élever le nuage jusqu'à son point d'équilibre, quelle que soit sa grandeur et sa densité.

L'abbé Bertholon l'avait compris de même et l'explique, mais plus naïvement, de la manière suivante. Pour lui, il y a échange d'électricité entre la terre et l'atmosphère et il en conclut que le fluide terrestre ne peut s'échapper de la terre sans entraîner avec lui des molécules d'eau. « Supposons, dit-il, que l'atmosphère étant électrisée négativement, le fluide électrique soit surabondant dans la terre, celui-ci doit pour se mettre à l'égalité se répandre dans l'atmosphère. Dans cette circonstance toutes les parties solides et fluides qui sont dans la terre seront ainsi pleines du fluide électrique, toutes leurs parties se repousseront et tendront à s'échapper effectivement lorsque leur force de cohésion sera inférieure à la force de répulsion électrique ; » (1) de

(1) *De l'Électricité des Météores*, Bertholon, p. 93.

sorte que, d'après lui « les vapeurs qui s'élèvent continuellement de notre globe ne montent dans l'atmosphère que par un effet de l'attraction ou de la répulsion électrique ou de toutes les deux ensemble, de même qu'on voit un corps plus pesant que l'air tel qu'un petit ballon de baudruche, quoique plein d'air atmosphérique, s'élever vers le conducteur de la machine dès qu'on l'électrise, se soutenir dans l'air tant que l'électricité dure et retomber ensuite dès qu'elle cesse. » L'abbé Bertholon va même plus loin car il attribue aussi, en partie, à l'électricité les variations barométriques ; il pense que le fluide, en s'échappant de la terre pour monter dans l'air, en diminue la pesanteur et celles des vapeurs qui y sont disséminées, ce qui amène un abaissement plus ou moins grand de la colonne de mercure.

III

ÉLECTRICITÉ COSMIQUE

Après avoir admis que l'électricité remplit notre atmosphère et s'accroît avec l'altitude, faisons monter avec elle nos pensées et nos recherches; et dépassant successivement les nimbus, les strato-cumulus, les stratus et les cirrus, nous arriverons dans ces régions où l'air est raréfié. A mesure que la densité diminue, la conductibilité augmente et l'électricité doit se répandre dans les espaces sans limites qui s'étendent au-delà de notre atmosphère et où se meuvent tant de corps inconnus.

Faudrait-il en conclure avec M. Oltramare que si le potentiel électrique s'accroît suivant une certaine hauteur, il doit, après avoir atteint un maximum, prendre la loi contraire et décroître en raison inverse de la conductibilité jusqu'à devenir nul?

On pourrait d'abord le croire en considérant les expériences de MM. Warren de la Rue et Hugo W. Müller, sur les décharges électriques dans des tubes à gaz raréfié. A mesure que la pression diminuait, la force électro motrice nécessaire pour faire passer un courant diminuait d'abord pour augmenter ensuite jusqu'à une pression pour laquelle aucune force électro motrice n'était capable de produire une décharge à travers le gaz résidu (1). Ce n'est pas l'opinion

(1) *Comptes rendus de l'Acad. des Sciences* pour 1878, T. I, p. 1072.

de M. Edlund qui a essayé de démontrer que le vide est au contraire un conducteur de l'électricité ou qu'il lui oppose une résistance insignifiante (1).

Mais dans tous les cas, s'il n'y a pas de décharges disruptives proprement dites on ne peut concevoir que les phénomènes électriques cessent de se manifester dans le vide et que l'électricité ne soit pas, là comme ailleurs, cette force capable d'engendrer de si puissants effets.

Du reste, si le vide existe dans les espaces interplanétaires il y a d'autres atmosphères que celle qui enveloppe le globe terrestre et dans ces milliards de corps, de mondes, dont nous ne pouvons guère chiffrer ni le nombre ni les dimensions, peut-on admettre qu'il n'y ait ni frottements, ni dégagements de chaleur et de lumière, ni chocs, ni évaporations, ni réactions chimiques d'aucune sorte, toutes causes qui doivent forcément produire l'électricité; mais ici dans quelles proportions? Notre faible esprit se refuse à l'imaginer et à le comprendre.

Comètes

Ces suppositions sont loin d'être chimériques, car peu à peu les astronomes sont forcés de constater des phénomènes étranges, auxquels ils ne peuvent donner d'explications rationnelles qu'en admettant une influence électrique.

Les recherches de MM. d'Urbanitzky et Reitlinger (2) sur les répulsions électriques observées dans un tube de Geissler à perchlorure d'étain et à brome les ont conduits

(1) *Philosophical Magazine*, T. XIII, p. 1, 1882.
(2) *Comptes rendus de l'Acad. des Sciences* pour 1876, T. II, p. 1014.

à assimiler ces répulsions à celle que le soleil exerce sur la queue des comètes ; l'examen spectroscopique leur a donné raison. D'après eux, *cette force doit être électrique* et ils ne font en cela que confirmer l'opinion d'Olbers et de Zollner; et comme M. Faye avait déjà observé que cette force diminue avec le carré de la distance et qu'elle est proportionnelle aux surfaces actives, cela s'accorderait assez bien avec l'hypothèse d'une force électrique.

De plus, M. Flammarion remarque, au sujet des comètes, la parfaite transparence de leurs chevelures, ces traînées de lumière appelées par Herschell « ombres négatives. » M. Flammarion pense qu'elles ne sont pas matérielles ; il ne croit pas que ce soient des gaz refoulés par une foree solaire répulsive, mais plutôt *une excitation électrique* produite par l'astre, à l'opposé du soleil, dans la trace de son ombre pour ainsi dire : 1° parce que les étoiles peuvent être aperçues au travers de cette queue lumineuse; 2° parce que la queue de la comète de 1880, par exemple, aurait dû balayer l'espace avec une vitesse de 64 millions de lieues par seconde et qu'une molécule de matière quelconque ne pourrait jamais demeurer animée d'une pareille vitesse, sous la dépendance du soleil et décrire une orbite fermée : « Est-ce une illumination électrique de l'éther, est-ce un mouvement ondulatoire excité par la comète elle-même à l'opposé du soleil, nous ne connaissons pas les forces de la nature (1). »

M. Faye s'étonne que M. Flammarion ait pu mettre en doute la non matériabilité des chevelures cométaires; il rappelle que d'après Newton, chaque tranche de la queue prise à un instant donné a été abandonnée par la tête à une

(1) *Comptes rendus de l'Acad. des Sciences* pour 1881, T. I, p. 1491.

époque antérieure d'autant plus éloignée que cette tranche est elle-même plus distante du noyau. M. Faye compare cette chevelure au panache de fumée qui s'échappe de la cheminée d'un paquebot en marche. Ce ne serait qu'une série de bouffées de matière cométaire successivement émises sans qu'il subsiste entre elles d'autre liaison que la commune vitesse de translation qu'elles possédaient à leur point de départ (1).

Mais il importe peu à notre sujet de suivre dans tous leurs détails ces intéressantes discussions ainsi que les savantes propositions de MM. Tacchini, Jamin, Prasmowski, etc., sur la constitution des comètes; aucune de ces théories n'est et, du reste, ne peut être opposée à la supposition d'une cause électrique.

Nébuleuses

Gaston Planté ne s'en est pas tenu à de simples suppositions hypothétiques; il procédait par analogie et ses savantes expériences lui permettaient d'étudier un phénomène de météorologie ou de physique céleste dans toutes ses phases et dans toutes ses manifestations.

Par exemple, on plonge le fil de cuivre composant l'électrode positive d'une batterie secondaire de 10 à 20 couples ou de 15 éléments Bunsen dans de l'eau acidulée au 1/10 et déjà en communication avec l'électrode négative. Une oxydation considérable se produit et un nuage d'oxyde s'échappe en flocons abondants de l'extrémité du fil positif, qui prend la forme d'une pointe aiguë; si l'on présente à

(1) *Comptes rendus de l'Acad. des Sciences* pour 1881, T. II, p. 11.

cette pointe le pôle d'un aimant, le nuage d'oxyde s'anime d'un mouvement gyratoire très rapide dans un sens ou dans l'autre suivant le pôle de l'aimant (fig. 15).

Cette curieuse gyration a paru donner à Planté l'explication de la forme si bizarre des nébuleuses spirales. Le savant électricien nous fait remarquer que l'analogie est saisissante. En effet, ainsi qu'elles ont été décrites par lord Rosse, certaines nébuleuses, telles que celle de la Vierge, ont leur courbure dirigée de droite à gauche, d'autres ont leurs spires dirigées de gauche à droite comme la nébuleuse des Chiens de chasse.

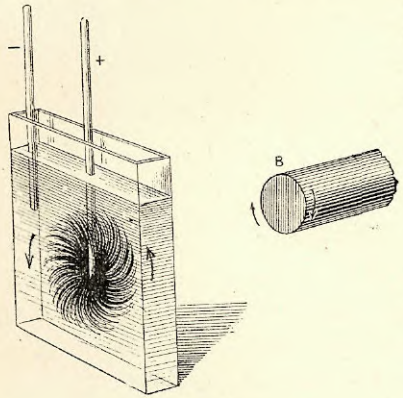

Fig. 15.

« N'est-on pas autorisé à penser, dit Planté, que le noyau de ces nébuleuses peut être constitué par un véritable foyer d'électricité, que leur forme en spirale doit être probablement déterminée par la présence de corps célestes fortement magnétiques placés dans le voisinage et que le sens de la courbure des spires doit dépendre de la nature du pôle magnétique tourné vers la nébuleuse (1). » Il nous fait même observer qu'il peut exister des groupes composés chacun d'un astre magnétique et de deux nébuleuses dont l'ensemble constituerait un système stellaire symétrique. « Les Chiens de chasse, nous dit-il, offrent ainsi une autre nébulosité en

(1) *Recherches sur l'électricité*, Gaston Planté, p. 242.

dehors du système principal de ses spires. » Il faudrait peut-être aussi examiner la constitution des nébuleuses à deux foyers du Lion, celle de la Vierge ou encore des amas du Sagittaire.

Planté s'adresse en conséquence aux astronomes et leur demande de diriger leurs recherches de manière à vérifier ces hypothèses si vraisemblables. « Si l'observation venait les justifier, ajoute-t-il, ce serait assurément une preuve décisive en faveur de la constitution électrique des corps célestes. »

Soleil et taches solaires

Planté avait déjà établi toute une théorie sur la constitution électrique du Soleil en particulier et sur les phénomènes qui agitent la photosphère.

Il connaissait d'ailleurs toutes les coïncidences qui existent entre les taches solaires et le magnétisme terrestre ; il savait aussi que plusieurs physiciens et astronomes, Herschell, Young, Ampère, Morton... avaient déjà attribué l'incandescence du Soleil à des courants électriques. Il nous cite les hypothèses de Le Verrier sur la constitution physique du Soleil, dans lesquelles l'auteur assimile l'astre aux corps célestes en général et le fait rentrer dans la loi commune qui les régit. Le Soleil, selon lui, serait formé d'un noyau liquide ou solide recouvert d'une atmosphère et il ajoute que quelle que soit la constitution de ce noyau la surface et l'intérieur doivent être au moins aussi tourmentés que la surface et l'intérieur de notre globe « et qu'il n'y doit manquer ni de trombes, ni de phénomènes électriques. »

Voici les expériences à la suite desquelles Planté a pu affermir ses suppositions sur des bases plus certaines et en faire des théories pour ainsi dire irréfutables :

1° Si l'on vient à toucher (fig. 16) avec l'électrode positive d'une batterie de 400 éléments secondaires, la surface humide d'un papier à filtrer déjà en communication avec

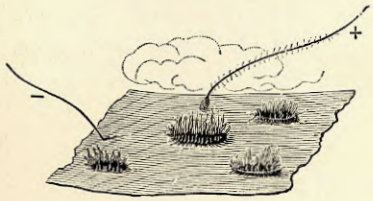

Fig. 16.

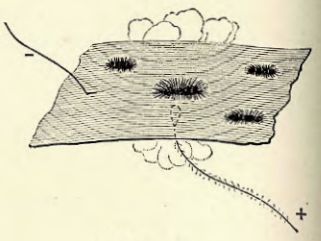

Fig. 17.

l'électrode négative, il se produit, avec dégagement de lumière et de vapeur, une sorte de cratère hérissé sur ses bords d'innombrables filaments desséchés et enchevêtrés les uns dans les autres, dont les extrémités sont dirigées vers l'électrode positive (fig. 17). Par suite de leur trop grande longueur quelques-uns de ces filaments se recourbent en crochet à leur extrémité.

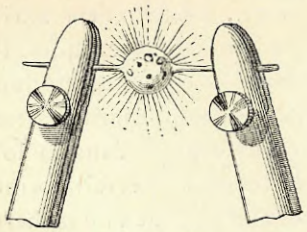

Fig. 18.

2° D'un autre côté, Planté ayant associé en surface 4 ou 5 de ces couples secondaires, fait fondre de gros fils de fer et obtient des globules fondus de 7 à 8 millimètres de diamètre (fig. 18) dont la surface incandescente est agitée et parsemée de taches produites par des bulles gazeuses venant de l'intérieur de ces globules. Les bulles percent l'enveloppe liquide avec projection d'étincelles; quant aux globules refroidis, ils présentent une surface ridée et mamelonnée.

Planté analyse les résultats de la première expérience et les compare avec les taches solaires et les perforations observées sur la photosphère; il fait remarquer que la matière considérée, bien que de nature différente dans ses expériences, peut subir l'action de l'électricité de la même manière. Car si, d'une part, on obtient la division

Fig. 19.

en filaments de la matière desséchée par les jets de vapeur d'eau, il se produit dans la masse minérale fluide et incandescente de la photosphère, des ruisseaux de matière lumineuse extrêmement divisée et des projections de vapeurs de substances minérales. « Ces apparences bizarres des taches solaires, dit Planté, si difficiles à expliquer par des actions mécaniques ordinaires se comprendraient donc

facilement par l'intervention de l'électricité, dont l'une des propriétés les plus caractérisques est de cliver, de façonner en pointes ou de diviser en filaments, toute matière opposée à son passage pour se frayer des voies multiples qui semblent nécessaires à son rapide écoulement. (1) »

Si l'on rapproche en effet l'une de l'autre les figures qui représentent l'expérience de Planté et celle qui montre les taches solaires telles qu'elles ont été observées par Nasmyth, par exemple, le 5 juin 1864 (fig. 19), il est facile de se convaincre de leur parfaite ressemblance. En outre, en lisant la description de l'expérience de notre savant électricien, on croirait avoir sous les yeux le compte rendu des observations de taches solaires faites par Chacornac, Tacchini, le P. Secchi... Chacornac et Secchi les assimilent à des brins de chanvre entrelacés et tordus, Nasmyth les appelle des feuilles de saule à cause de la forme allongée de ces sortes de ruisseaux de matières brillantes convergeant de tous côtés pour aboutir au contour du cratère. De même, les résultats obtenus par Planté dans sa seconde expérience (fig. 18) sont, sans y rien changer, conformes à ce que nous disent les astronomes de la surface solaire composée de rides, de points brillants, de lucules, de facules et de taches. (2)

Les hypothèses successivement présentées sur ce même sujet par Wilson, Kirchoff, Faye... ont plus souvent charmé par leur ingéniosité qu'elles n'ont expliqué la formation uniforme des corps célestes et leurs phénomènes étranges. La force mécanique intervient seule et ce sont ou bien des déchirures qui atteignent le noyau obscur du soleil, selon

(1) *Recherches sur l'électricité*, G. Planté, p. 246.

(2) Voir le *Soleil*, A. Guillemin, p. 146 et suiv. *Astronomie Populaire*, Camille Flammarion, p. 307 et suiv., etc.

Wilson, ou bien des courants verticaux qui dissipent momentanément la matière lumineuse de la photosphère, selon M. Faye.

Comme on peut s'en convaincre par tout ce qui précède Planté approche bien certainement davantage de la vérité et il continue à nous le prouver. Il fait remarquer que les globules présentent de brillantes éruptions par suite de l'agitation de leur masse interne sous l'action calorifique et chimique de l'électricité, que ces jets de gaz et de particules incandescentes se font nécessairement jour par des perforations produites dans la matière même du globule, ce qui amène des taches obscures sur sa surface brillante et ondulée, et enfin que par suite de l'amincissement plus ou moins grand de l'enveloppe autour des cratères d'éruption, des portions de la surface paraissent plus ou moins brillantes dans le voisinage des taches. Il déduit de toutes ces observations :

1° Que le Soleil peut être considéré comme un globe creux électrisé, plein de gaz et de vapeurs, recouvert d'une enveloppe de matière fondue et incandescente ;

2° Que les rides ou lucules de sa surface proviennent des ondulations de cette enveloppe liquéfiée ;

3° Que les taches sont simplement des perforations de l'enveloppe fluide, produites par les masses de gaz et de vapeurs électrisées venant de l'intérieur de l'astre, et donnant aux rebords des cavités, ainsi qu'il a été dit plus haut, les formes qui caractérisent le passage de l'électricité positive ;

4° Que les facules semblent être une phase brillante dans l'évolution des masses gazeuses lorsqu'elles se rapprochent de la surface avant leur éruption ;

5° Que les protubérances sont formées par les gaz eux-

mêmes sortant de l'intérieur de l'astre à une température plus élevée et par suite plus lumineux que ceux qui forment l'atmosphère de la surface (1).

Nous devons ajouter que les bulles qui ont crevé à la surface des globules métalliques refroidis représentent l'image frappante des cratères éteints de la Lune.

Planté va au devant des objections qu'il est possible de lui opposer ; en effet, les globules métalliques sont produits entre les deux pôles d'un appareil et traversés par un courant électrique tandis que le Soleil est isolé dans l'espace, mais il rappelle qu'il a pu obtenir, à l'aide de ces courants puissants, une projection de sphéroïdes électrisés entièrement détachés de la source d'où ils émanent et emportant avec eux une certaine quantité d'électricité de tension (2). Enfin, il complète l'expérience des globules métalliques en laissant fondre le fil qui, alors, se rompt ; le courant est interrompu, le globe reste suspendu à l'un des pôles et pendant qu'il est encore incandescent, des taches se produisent et des bulles se dégagent de sa surface.

Il conclut ainsi : « Si ce phénomène dure un temps appréciable avec une aussi petite masse de matière, on comprend quelle durée il peut avoir quand il s'agit du globe immense du Soleil. Le mouvement vibratoire électrique communiqué doit persister, à l'instar du mouvement mécanique, avec les effets physiques et chimiques qui lui sont propres ».

« Ainsi nous pensons que le soleil est électrisé, mais qu'il ne crée pas l'électricité qu'il possède non plus que la chaleur et la lumière qui en sont la transformation : c'est

(1) *Recherches sur l'électricité*, G. Planté, p. 249.

(2) Nous retrouverons cette dernière expérience dans le chapitre IV: *Grêle*.

une provision qu'il aurait reçue de l'anneau nébuleux dont il n'est qu'une particule brillante, destinée à s'éteindre un jour ; cet anneau nébuleux dériverait d'une autre onde électrisée, et ainsi de suite, jusqu'à la cause première, créatrice de toute force et de tout mouvement. Considérée à ce point de vue, l'incandescence du globe solaire prolongée pendant une longue série de siècles, ne serait elle-même qu'une étincelle de courte durée dans l'infini du temps et de l'espace. »

M. Zenger, continuant les expériences de Faraday et celles plus récentes de M. Puluj au sujet de l'induction unipolaire et bipolaire exercée sur une sphère tournante, en arrive à conclure que les résultats obtenus peuvent servir à expliquer le mouvement orbital des planètes et des comètes dans notre système solaire. Il propose donc de remplacer l'hypothèse de la gravitation universelle par celle très vraisemblable d'une action électro-dynamique du Soleil (1).

M. Tisserand avait aussi démontré que si l'on appliquait la loi d'attraction électro-dynamique de Gauss au mouvement des corps célestes, on rendrait compte, pour les trois quarts de sa valeur, de l'écart d'environ 38" par siècle qui existe entre le mouvement de périhélie de Mercure tel qu'il résulte des observations et celui que le calcul permet d'attribuer au mouvement des planètes. La formule de Weber pouvait également être appliquée ; M. Maurice Lévy rappelle que la loi de Riemann est d'accord, ainsi que celle de Weber, avec le principe de l'énergie et avec les faits constatés en électricité, et il prouve que de ces deux lois il est possible d'en déduire une foule d'autres parmi lesquelles il en est une qui, appliquée aux corps célestes, fournit le mou-

(1) *Comptes Rendus de l'Acad. des Sciences* pour 1889, T. II (Séance du 19 août).

vement du périhélie de Mercure avec telle approximation que l'on veut (1).

Il ne faut pas que la hardiesse de ces hypothèses nous surprenne, car les expériences de M. Elihu Thomson nous montrent ce que peuvent produire les courants électriques comme répulsions et rotations. Le savant américain se sert de machines à courants alternatifs dont les flux de force alternés peuvent changer de sens jusqu'à deux et trois cents fois par seconde : si l'on enfile un anneau de fer sur un noyau entouré d'une bobine dont les fils sont parcourus par des courants alternatifs, cet anneau, abandonné à lui-même, saute verticalement et s'élève jusqu'à 40 centimètres au-dessus du noyau de fer. Dans un vase à demi rempli d'eau et posé sur la bobine, plonge une sphère qui, repoussée, prend en même temps un mouvement de rotation rapide, etc. (2)

Si maintenant on cherche à réunir ces observations éparses, ces théories, ces expériences et ces analogies pour considérer dans leur ensemble notre globe, notre atmosphère, ces masses nuageuses soumises dans l'espace à une mystérieuse puissance qui tantôt les repousse et tantôt les attire, puis ces mondes innombrables qui peuplent les espaces célestes, ces soleils en formation, actifs ou éteints, on pourrait voir tout l'univers créé soumis à l'électricité, tout mouvement, répulsion, attraction, rotation, produit par cette force, tout phénomène engendré par elle : mouvement gyratoire des nébuleuses, chevelures lumineuses des comètes, attractions et répulsions solaires, constitution physique des soleils, taches et éruptions des photosphères...

(1) *Comptes Rendus de l'Acad. des Sciences* pour 1890, T. I (Séance du 24 mars).

(2) *La Nature*, 1889. T. II, p. 145.

On en arriverait enfin à penser que l'électricité a été, dès l'origine, entre les mains de Dieu, la première force créée, immuable et obéissante, qui a lancé les mondes dans l'espace, a tout réglé et tout distribué.

Influence des taches solaires sur le magnétisme terrestre et l'électricité atmosphérique

Le major Sabine est le premier qui en 1857 s'aperçut de la concordance que présentaient les variations de déclinaison de l'aiguille aimantée et le nombre des taches solaires ; il avait observé et noté ces variations pendant de longues années. En même temps, à Dessau, le conseiller aulique Schwabe avait relevé le nombre des groupes de taches solaires et en avait dressé des tableaux ; quand on vint à comparer ces deux résultats les courbes étaient identiques.

On se demanda si les taches solaires étaient la cause directe et unique des perturbations magnétiques, mais de nouvelles observations prouvèrent qu'en l'absence de taches, des variations se faisaient également sentir dans la déclinaison. Cependant, il était évident que d'après les périodicités précédentes, il n'était pas possible de nier l'influence exercée par les phénomènes solaires sur l'électricité terrestre ; la théorie de Gaston Planté sur la constitution électrique du Soleil nous l'a fait comprendre et cette opinion est confirmée par un grand nombre de remarques. Citons-en quelques-unes :

Quet regardait le Soleil comme le siége de courants électriques fermés qui induiraient la Terre par suite de leur rotation et il rentre ainsi dans la catégorie des nombreux théoriciens qui affirment l'influence des taches solaires sur

le magnétisme terrestre et l'étroite relation existant entre elles et les phénomènes qui troublent notre atmosphère et notre globe.

Luvini déclare que sans s'éloigner des idées reçues dans la science on peut : « considérer le Soleil et la Terre comme deux aimants lancés dans l'espace et réagissant l'un sur l'autre. » Tout changement de distance, d'intensité magnétique ou de position relative des axes des deux aimants, engendrera dans les éléments magnétiques des deux astres, des troubles que l'on pourrait assujettir au calcul si l'on en connaissait les lois (1).

Les deux astronomes Carrington et Hodgson qui observaient le Soleil indépendamment l'un de l'autre en septembre 1859, le premier sur un écran qui recevait l'image, le deuxième directement, furent un instant éblouis par un éclair qui jaillit tout d'un coup au milieu d'un groupe de taches. Cette lumière scintilla pendant cinq minutes au-dessus des taches. « Or, voici une coïncidence surprenante, dit M. Flammarion qui rapporte ce fait, au moment même où le Soleil parut ainsi enflammé dans cette région, les instruments magnétiques de l'observatoire de Kew près de Londres, où l'on était en observation, manifestèrent une agitation étrange, l'aiguille aimantée sauta pendant plus d'une heure comme affolée. De plus, une partie de la terre a été ce jour-là et le jour suivant enveloppée des feux d'une aurore boréale en Europe comme en Amérique. On en signala presque partout, à Rome, à Calcutta, à Cuba, en Australie et dans l'Amérique du Sud. De violentes perturbations magnétiques se manifestèrent sur plusieurs points; les lignes télégraphiques cessèrent de fonctionner. Comment ne pas associer l'un à l'autre ces deux événements si curiéux (1). »

(1) *Lumière Electrique*, 18 mai 1889. T. XXXII, p. 312.

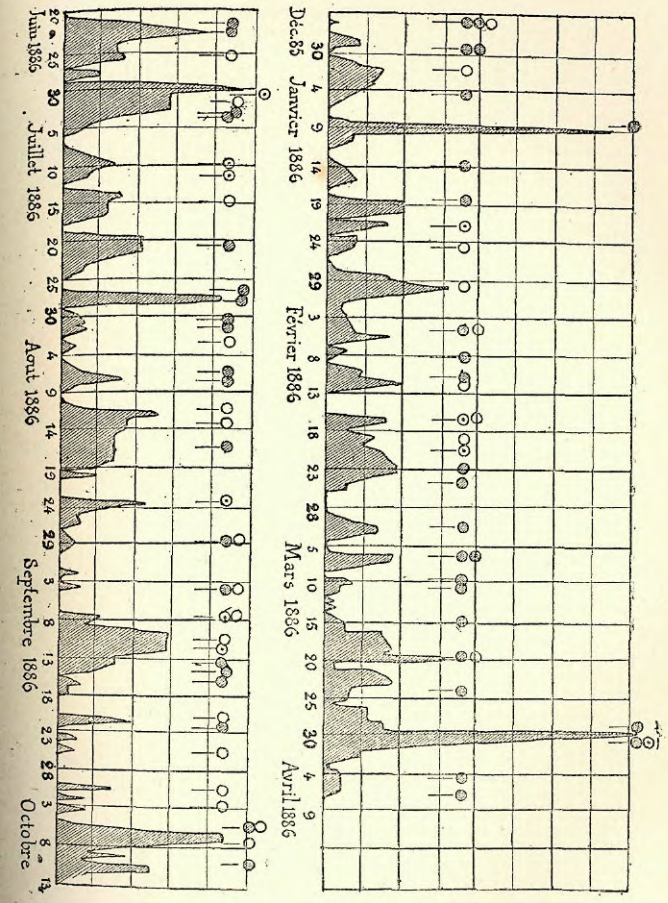

Fig. 20.

M. Marchand étudia les taches solaires à l'observatoire

(1) *Astronomie populaire*, C. Flammarion, p. 362.

de Lyon et rapprocha ses résultats des courbes obtenues avec l'enregistreur magnétique, système Mascart. Il conclut que chacun des maxima magnétiques coïncide avec le passage d'un groupe de taches ou d'un groupe de facules à sa plus courte distance au centre du disque solaire. C'est ce que montrent les diagrammes ci-joints (fig. 20) dans lesquels sont indiqués au-dessus de la couche magnétique les passages : 1° des groupes de taches représentés par un cercle noir; 2° des facules par un cercle blanc; 3° des facules avec pores ou taches très petites par des cercles avec un point au centre. M. Marchand remarque qu'il ne semble pas y avoir de relations entre l'intensité des perturbations et le diamètre des taches (1).

D'un autre côté, on croit aussi que le Soleil exerce son action sur le potentiel électrique de l'atmosphère. MM. Elster et Geitel de Hanovre pensèrent qu'il était possible de reconnaître cette influence pendant une éclipse en observant particulièrement les parties de l'atmosphère frappées les premières par l'ombre lunaire. Lors de l'éclipse totale du 19 août 1887, à l'aide d'un électroscope transportable de Exner, ils ont constaté une diminution considérable de potentiel pendant la durée de l'éclipse (2). Le professeur Stokes a remarqué qu'un accroissement du pouvoir rayonnant du Soleil impliquerait une élévation de température des hautes régions atmosphériques et par suite une plus grande conductibilité électrique; le courant en serait lui-même augmenté. (3)

Selon Zenger, l'action électrique du Soleil se manifeste

(1) *Comptes rendus de l'Acad. des Sciences* pour 1887, T. I (Séance du 3 janvier).
(2) *Lumière électrique.* T. XXVII, p. 392.
(3) *Rev. Intern. de l'Elect.* T. II, p. 29.

comme cause principale et l'action électrique entre la terre et les nuages cosmiques comme cause secondaire des perturbations magnétiques (1).

Balfour-Stewart, Tacchini, Lemstrom, l'abbé Fortin, etc, et une foule d'autres savants affirment l'influence solaire sur l'électricité atmosphérique et terrestre. Les observations précédentes et en particulier celles de Planté rendent cette conclusion très plausible et l'on conçoit qu'un flux si intense d'électricité émis par les corps célestes en général doit réagir sur le potentiel électrique de notre globe. De là dériveront forcément d'autres rapports entre ces phénomènes solaires et les troubles météorologiques; nous noterons ces rapports dans chacun de nos chapitres et nous verrons que sans accorder aux premiers une cause déterminante sur les seconds, il n'en faut pas moins reconnaître qu'il existe une étroite corrélation entre tous les phénomènes cosmiques et terrestres.

(1) *Comptes rendus de l'Acad. des Sciences* pour 1887, T. I (Séance du 6 juin).

IV

ORIGINES DE L'ÉLECTRICITÉ ATMOSPHÉRIQUE

La question des origines de l'électricité atmosphérique est une des plus importantes et par suite des plus controversées; tous les savants, physiciens, chimistes, météorologistes, électriciens s'en sont emparés et ont tenté de la résoudre. Chacun essayait, à l'aide de ses études préférées, de la relier aux phénomènes qui l'occupaient plus spécialement. Toute force, comme nous l'avons dit, tout changement d'état amenant une production d'électricité, on conçoit que les hypothèses n'aient pas manqué et qu'il en soit venu de tous côtés. Nous allons examiner les principales le plus succinctement possible.

Nous pouvons déjà pressentir l'opinion de plusieurs savants à ce sujet, car ils assignaient évidemment telle ou telle origine à l'électricité atmosphérique selon la manière dont ils en expliquaient la distribution. On sait de plus que l'on obtient une production d'électricité de quatre manières principales : par frottement, par réaction chimique, par simple contact et par induction : la classification des systèmes que nous allons étudier se fait donc d'elle-même ; nous les ramènerons aux trois principes suivants : frottement, évaporation, émission, car l'induction est nécessairement écartée, puisque dans ce cas il faut une cause inductrice dont on doit rechercher l'origine.

I. Frottement

La première et seule cause connue productrice d'électricité, était le frottement ; il fut donc naturel de la proposer d'abord comme source de l'électricité atmosphérique que les premiers électriciens faisaient dériver du frottement des couches d'air les unes contre les autres et principalement contre la surface terrestre ; et puisque de deux corps frottés l'un est électrisé positivement et l'autre négativement ils vérifiaient ainsi les observations générales qui accusaient, en temps ordinaire, de l'électricité positive dans l'air et de l'électricité négative dans le sol.

Longtemps abandonnée pour l'évaporation et les actions chimiques, cette idée fut reprise par Hoppe ; il croyait que l'électricité de l'atmosphère prenait naissance dans le frottement de la vapeur d'eau contre les parties solides de la surface terrestre. M. Jordan combat cette hypothèse ; il reconnaît que le plus grand frottement doit provenir des mouvements ascensionnels et des changements de direction des particules de vapeur d'eau qui se meuvent au milieu de l'air sec, mais que ce frottement n'a qu'une faible importance en général, et qu'il ne peut se produire que sur le flanc des montagnes, là enfin où des vents chargés d'humidité glissent le long de la surface des terres. M. Andriès modifie cette croyance et affirme qu'il faut chercher cette origine dans le frottement des globules d'eau contre l'air humide.

Vient ensuite la théorie de M. Luvini. Il prend comme base de son système les expériences de Faraday sur l'électrisation de certains corps, bois, cuivre.... sous l'influence

d'un jet de vapeur d'eau. Faraday avait aussi fait des essais avec l'air humide et le trouvait complétement incapable de développer de l'électricité, excepté dans le cas où, après l'avoir comprimé, il le laissait s'échapper sans lui avoir donné le temps de sécher; le bois, le cuivre... s'électrisaient alors négativement. C'était donc la preuve que l'effet était dû au frottement de la vapeur d'eau sur les corps quels qu'ils soient (1). M. Luvini en déduit cette proposition, à savoir que la glace, en particulier, peut s'électriser par le frottement de l'air humide. En effet, M. Sonke ayant renouvelé ces expériences les vérifia et acquit la preuve de leur exactitude.

D'un autre côté, M. Luvini rappelle que la glace est classée parmi les corps isolants, et que l'air humide doit être considéré comme mauvais conducteur. Il cite les expériences de deux savants italiens, MM. Agostini et Marangoni qui démontrent que la dissipation de l'électricité des conducteurs d'une machine n'a pas lieu à travers l'air humide, mais bien à travers le voile humide continu qui peut se former sur les supports isolants (2).

Enfin M. Luvini déclare que les nuages sont des conducteurs imparfaits. En effet, cette dernière observation a été faite par plusieurs météorologistes et physiciens, et Bellani nous dit à ce sujet: « La conductibilité imparfaite des nuages est la cause des éclairs fréquents qui apparaissent par intervalles à la surface des nuages, parce que le fluide électrique se transporte avec une certaine lenteur de l'intérieur à la surface de la masse vaporeuse entière. Le nuage n'est pas un tout conducteur; l'électricité demeure sur cha-

(1) *Annales de physique et de chimie*, 3e Série, T. X, p. 101, 1844.
(2) *Revista Scientifica di Vimercati*, 1881, p. 10, et *Lumière électrique*, 1881.

que particule de vapeur et non sur la surface du nuage, car l'espace occupé par l'air entre les particules est de beaucoup plus grand que l'espace occupé par ces dernières (1).» Peltier, Spallanzani ont conclu de même et Colladon explique par l'existence de centres électriques indépendants et séparés les uns des autres, les lueurs et les éclairs qui sillonnent une masse nuageuse.

M. Luvini ayant réuni toutes ces considérations, s'en sert pour édifier sa théorie fondée sur l'électrisation des aiguilles de glace des cirrus frottés par l'air humide; le potentiel électrique qu'elles acquièrent dépend, selon lui, de la vitesse des courants qui les font mouvoir et de la quantité des vapeurs contenues dans l'air. Ce courant d'air serait en somme le distributeur de l'électricité atmosphérique : « Une partie de cet air peut passer dans les régions supérieures à celle des aiguilles de glace où lorsqu'il arrive à une hauteur suffisante, il peut devenir conducteur et dans ce cas l'électricité négative se répandra dans les couches les plus élevées de l'atmosphère, dans les régions des aurores polaires, et celle-ci ne pourra plus descendre dans les régions inférieures à moins de circonstances particulières. Une autre partie de cet air électrisé négativement peut descendre au dessous de la couche des aiguilles de glace où une portion de son électricité se neutralisera avec l'électricité contraire des aiguilles entraînées vers le bas et liquéfiées ou vaporisées; une autre portion se neutralisera avec l'électricité positive des vapeurs qui pourraient monter de la surface des eaux et du sol jusqu'à la hauteur de ces régions. Une troisième portion descendra dans le réservoir commun emportée par les vapeurs qui, sous une forme quelconque,

(1) *Mémoria Sulla Grandine*, Bellani, p. 29, 1834.

se précipitera sur la terre ; une quatrième portion enfin se maintiendra à l'état de tension négative dans laquelle elle se trouve. » (1) M. Luvini en conclut que suivant l'espace occupé par cette quatrième et dernière portion, et suivant le degré de concentration des vapeurs, la tension électrique qui en résulte est extrêmement variable mais sera toujours moindre que la tension positive des aiguilles de glace, c'est pourquoi l'air apparaît électrisé positivement.

M. Luvini explique à l'aide de son hypothèse les variations annuelles et diurnes du potentiel atmosphérique : il doit être plus grand en hiver et plus faible en été puisque dans le premier cas la région des aiguilles de glace est nécessairement à une hauteur moins grande que dans le second et c'est pour la même raison, d'après lui, que l'électricité est plus intense la nuit que le jour.

M. Giovani Guglielmo, de l'Université royale de Sassari, ne croit pas comme Luvini que l'air humide puisse jamais devenir un isolateur ; il assure que pour un potentiel supérieur à 600 volts la déperdition dans l'air humide est plus forte que dans l'air sec et d'autant plus grande que le potentiel est plus élevé et la vapeur d'eau plus voisine du point de saturation (2). Il est vrai que M. Luvini a fait de nouvelles expériences qui le confirment dans son opinion, mais nous ne pourrions l'adopter sans rejeter, du même coup, une foule d'autres théories à l'aide desquelles on rend compte, dans tous leurs détails, des diverses perturbations atmosphériques.

D'ailleurs, pour pouvoir affirmer que l'air humide est

(1) *Etude sur l'Electricité atmosphérique*, Luvini, p. 158, Turin, 1884.

(2) *Acad. des sciences de Turin* 1887 et *Rev. Intern. de l'Elect.*, T. VI, 1888, p. 67.

FAC. DE FILOSOFIA - BIBLIOTECA

mauvais conducteur, M. Luvini a recours à une subtilité de raisonnement qui lui a été fournie par MM. Agostini et Marangoni. En effet, le voile humide, dont ils parlent, dépend uniquement de l'état hygrométrique de l'air environnant, « et encore, ajoutent-ils, sans ce voile, la déperdition est très lente » ; elle se fait donc quand même. D'un autre côté, on ne voit pas très bien l'atmosphère comparée, quant à la conductibilité, à une machine pourvue de conducteurs et d'isolateurs.

Enfin, il semble fort difficile d'admettre avec M. Luvini cette division des aiguilles de glace en quatre parties, dont chacune aurait un rôle compliqué et déterminé d'avance.

L'hypothèse présentée par M. Le Goarant de Tromelin nous semble plus simple ; elle vient servir d'intermédiaire entre les théories du frottement et celles qui s'inspirent de l'évaporation. M. de Tromelin a été conduit à admettre en première ligne le frottement de l'air humide ou sec contre la surface des terres et des mers. Après avoir rappelé, comme M. Luvini, les expériences de Faraday, il cite les phénomènes qui se produisent dans la machine électrique d'Armstrong : lorsque la vapeur d'eau sort de la chaudière cette dernière reste chargée négativement tandis que la vapeur l'est positivement. Cette machine comporte une boîte remplie d'eau pour refroidir les tubes d'échappement ; la vapeur, avant d'atteindre les ajutages de sortie, éprouve ainsi un commencement de condensation et sort mélangée de vésicules d'eau. M. de Tromelin fait remarquer que si le vent produit l'évaporation, il agit aussi par frottement et c'est, selon lui, dans ce dernier travail mécanique qu'il faut chercher la principale cause d'électricité.

« Le vent, dit-il, en rasant la surface des mers, entraîne des particules aqueuses de la crête des lames qui jouent le rôle

du peigne de la machine d'Armstrong. Les aspérités du sol jouent encore le même rôle lorsqu'un vent humide vient à les frotter. Ces molécules d'eau restent électrisées et montent dans l'atmosphère former les nuages et comme l'électricité se porte à la surface des corps elle tendra à se répandre sur les surfaces atmosphériques les plus élevées, et je pense, comme M. Faye, que les cirrus doivent retenir une grande partie de cette électricité (1). »

II. Evaporation

C'est Volta qui proposa le premier, comme source principale d'électricité, l'évaporation produite continuellement à la surface du globe. Cette théorie semblait mieux convenir, selon lui, à la production d'une aussi grande masse d'électricité et il y avait tant d'objections présentées et acceptées contre le système de frottement qu'il ne fut pas difficile au savant physicien de faire adopter cette innovation. Entrevue seulement par Volta, cette théorie fut affirmée par Lavoisier, Laplace, puis par Saussure qui explique en détail toute la circulation de l'électricité entre la surface du sol et l'atmosphère. S'élevant sans cesse de terre par l'évaporation, « le fluide, dit-il, redescend actif; les cimes des arbres, les feuilles vont au-devant de lui, il passe au travers des végétaux qu'il anime et auxquels il donne la partie la plus active et la plus savoureuse, car pourquoi les plantes qui croissent sur les rocs nus et escarpés surpassent-elles si fort en saveur et en vertus médicinales celles du même genre qui croissent dans le plat pays, si ce n'est la quantité du fluide qui est beaucoup plus grande sur les cimes isolées ? »

(1) *Comptes rendus de l'Acad. des sciences* pour 1884, T. I, p. 248.

« Et les animaux ne jouissent-ils pas de l'influence médicinale de ce fluide ? Depuis que les expériences ont prouvé que l'électricité atmosphérique se fait sentir si près de la surface de la terre peut-on douter que la douce et continuelle électrisation que subit un homme qui se promène au grand air, n'influe sur ses organes, sur la circulation du sang, sur la sécrétion des humeurs, sur la transpiration insensible ; et cette électricité ne serait-elle pas une des raisons pour lesquelles l'exercice au grand air contribue beaucoup plus à la conservation ou au rétablissement de la santé que celui que l'on prend à couvert et dans les endroits fermés. » (1)

Enfin, conformément à de nombreuses expériences, Pouillet remarque que l'évaporation des eaux salines est toujours accompagnée d'un dégagement considérable d'électricité et que par suite les eaux de la mer en fournissent une quantité incroyable.

A cette croyance fortifiée par les expériences et les travaux de Matteucci, de du Bois Raymond..., Becquerel vient ajouter une nouvelle influence, celle de la végétation. Il présenta en 1850, un mémoire dans lequel il résuma ses études ; à l'aide d'aiguilles de platine implantées, l'une dans l'écorce d'un arbre, l'autre dans le bois, il avait pu se convaincre : 1° de la présence de courants dérivés dans les tiges des végétaux et dirigés du parenchyme à la moëlle ; 2° de la production de courants dérivés allant du cambium au parenchyme, dirigés en sens inverse ; 3° de la production de courants allant de la moëlle à l'écorce par l'inter-

(1) *Voyage dans les Alpes*, T. II, p. 152.

médiaire des racines et leur sens montrait que la terre prenait continuellement un excès d'électricité positive, et le parenchyme un excès d'électricité négative transmis à l'air au moyen des vapeurs d'eau. Becquerel constate ensuite que l'état des feuilles est semblable à celui de la partie verte du parenchyme de l'écorce, c'est-à-dire que la sève qui circule dans leurs tissus est négative par rapport au ligneux, à la moëlle et à la terre et qu'elle est positive par rapport au cambium.

Becquerel pose les conclusions suivantes, à savoir que parmi les sources naturelles d'électricité qui en fournissent continuellement à l'air on doit distinguer :

1° L'exhalation de l'oxygène et du gaz acide carbonique par les feuilles des végétaux ;

2° Le contact des terres et des eaux douces ou salées ; les premières prennent un excès d'électricité positive et les secondes un excès d'électricité négative.

3° La décomposition des matières animales et végétales à la surface de la terre et dans l'eau ;

4° Le contact des eaux froides et des eaux chaudes circulant à la surface des mers : les eaux froides sont positives à l'égard des eaux chaudes.

« Or, dit-il, comme ces sources dégagent les unes de l'électricité positive, les autres de l'électricité négative, il s'opère donc des recompositions continuelles et l'électricité atmosphérique prouve qu'en définitive la résultante est un excès d'électricité positive. (1) »

M. Arrhénius a voulu utiliser la découverte de l'action de la lumière ultra-violette sur les corps électrisés pour établir une théorie des phénomènes électriques de l'atmosphère (1). Grâce à l'éclairage par les rayons ultra-violets, l'air se chargerait de l'électricité négative de la surface du sol par suite d'un phénomène semblable à celui qui se produit quand on éclaire une plaque de métal poli chargée négativement.

(1) *Hist. de l'électricité et du magnétisme*, Becquerel, p. 172.

M. Lampa trouve que cette théorie repose sur des données très incertaines, car toute la question est de savoir si l'électricité négative de la terre éclairée se conduit vraiment comme celle d'une plaque métallique. Or, il n'est pas probable que les substances qui constituent la surface du globe puissent se comporter comme du métal poli; des essais exécutés au cabinet de physique de l'Université de Vienne sont venus confirmer ces doutes (2).

Pour M. Lecher, la terre est également électro-négative par rapport à l'air, c'est-à-dire qu'elle possède un potentiel moindre. Partant de là, il admet que la vapeur d'eau qui s'élève de la terre emporte avec elle une charge négative qui diminue d'autant le potentiel atmosphérique. En cas de condensation subite des vapeurs, (condensation qui est accompagnée d'une diminution de volume) le potentiel d'un point d'observation situé entre le nuage et la terre peut devenir nul ou même changer de signe, c'est-à-dire que le nuage sera électrisé négativement par rapport à la terre au lieu de l'électrisation positive qui est l'état normal de l'air. M. Lecher le démontre expérimentalement : une électrode à flamme est placée à une certaine distance d'une planche recouverte d'étain, représentant la surface terrestre. Cette planche est reliée au pôle négatif d'une pile Zamboni dont le pôle positif communique à la terre : un potentiel

(1) *Météorologische Zeitschrift*, 5e année, 1888, p. 297 et 348
(2) *Acad. des sciences de Vienne* (Séance du 17 avril 1890) et *Rev. Intern. de l'Elect.* T. XI, p. 102.

négatif de 200 à 250 volts est ainsi développé à sa surface. Le potentiel correspondant est indiqué par l'électromètre. Une feuille de papier chargée positivement et isolée est alors étendue au-dessus de la flamme et l'on observe une diminution de la déviation. En étendant successivement d'autres feuilles de papier chargées de même, la déviation devient de plus en plus faible et finit par prendre la direction opposée (1).

Shonbein, *l'inventeur* de l'ozone, fait subir une modification à la théorie de l'évaporation; étant donné que l'oxygène ordinaire à la température ambiante reste chimiquement indifférent en présence de la plupart des corps, il démontre que ce gaz réagit sur eux avec énergie sous l'influence de la lumière et de l'électricité et qu'il oxyde alors, même à froid, bon nombre de corps simples. C'est pourquoi de même que l'oxygène *ozonisé* par suite de son affinité exaltée pour l'hydrogène de l'eau, polarise ce liquide d'une manière sensible, de même l'oxygène *éclairé*, c'est-à-dire dont les propriétés chimiques sont surexcitées par l'action de la lumière, exerce à peu près la même influence. En conséquence, suivant M. Shonbein, les conditions essentielles de la production de l'électricité de l'air sont : la présence de nuages et un certain degré d'illumination de ces nuages par le soleil. Si une cause quelconque détermine la transformation de la vapeur d'eau de l'atmosphère en nuages, c'est-à-dire en opère la condensation, chaque particule de ce nuage qui se trouve en contact avec l'oxygène de l'air sous l'influence de la lumière, devra être électriquement excitée comme si elle se trouvait en contact de l'ozone. Un nuage fortement éclairé par le soleil doit donc être

(1) *Société Electrotechnique de Vienne* (Séance du 29 janvier 1890) et *Rev. Intern. de l'Elect.* T. XI, p. 31.

considéré comme un amas de particules d'eau électrisées ou de couples voltaïques moléculaires; et comme l'activité chimique de l'oxygène deviendra d'autant plus énergique que la lumière qui l'éclaire est plus intense, la force de la tension électrique des nuages devra être beaucoup plus prononcée en été qu'en hiver, à midi que le matin.

Doit-on plutôt prendre l'inverse de la question et faire résulter la transformation en ozone de l'oxygène excité par une effluve électrique? Ce serait évidemment réduire à néant la théorie de Shonbein emporté par l'ardeur de ses études sur l'ozone. C'est ce qu'on est amené à penser en remarquant les conclusions de M. Berthelot sur ce sujet dont il s'est spécialement occupé. D'après ses expériences, l'ozone est un corps formé par l'oxygène avec absorption de chaleur et engendré sous l'influence de l'électricité. M. Mascart, au nom d'un grand nombre de savants, a élevé la voix pour mettre en doute la véracité des théories de l'évaporation. Dans les cas d'ébullition tumultueuse, ce serait le frottement des matières solides ou liquides qui produit l'électricité, mais dans le cas d'évaporation lente, le flux électrique est très faible et inappréciable (1).

La théorie de Volta trouve, au contraire, dans M. Palmieri un partisan d'autant plus intéressé que des expériences nombreuses de vérification l'ont conduit à une conclusion identique. Il essaya d'abord de produire l'évaporation en faisant chauffer l'eau d'un vase et il en recevait la vapeur sur la partie concave d'une coupe de platine isolée et mise en communication avec l'électroscope condensateur de Bohnenberger; ou bien encore, il laissait tomber des gouttes d'eau sur la coupe de platine rougie au feu. M. Pal-

(1) *Comptes rendus de l'Acad. des Sciences* pour 1878, T. I, p. 575.

mieri obtint constamment des traces d'électricité positive, mais il pensa comme M. Mascart qu'une partie de cette électricité pouvait être obtenue par le frottement de la vapeur contre les parois, c'est pourquoi : « en raison de toutes ces difficultés, dit-il, je crois qu'il vaut mieux concentrer sur la surface de l'eau contenue dans une coupe de platine, un faisceau de rayons solaires à l'aide d'une lentille de 0,30*m*. de diamètre. On obtient alors une ébullition particulière car les bulles de vapeur partent toutes rapidement de la surface du liquide. On arrive à constater, à l'aide de l'électroscope condensateur, des traces faibles mais constantes d'électricité dans la coupe de platine qui contenait l'eau (1).

Puis, dans une note présentée à l'Académie des Sciences de Naples, le 4 août 1888, M. Palmieri décrit des expériences d'après lesquelles il constate que l'électricité produite par l'évaporation de l'eau des mers est uniquement due à l'action des rayons solaires. Enfin, pour M. Palmieri, l'électricité positive de l'atmosphère peut être considérée, ainsi que l'avait conclu Volta, comme dérivant de l'évaporation de l'eau sur notre globe, mais il maintient ses précédentes affirmations, à savoir que l'origine immédiate, directe de son développement, c'est la condensation des vapeurs.

Cette dernière proposition est le résultat des multiples observations de M. Palmieri que nous avons résumées plus haut. Cependant, il convient de remarquer que la condensation des vapeurs, comme nous l'avons dit aussi, détermine au lieu même de cette condensation l'élévation du potentiel électrique de l'atmosphère et par suite donne

(1) *Lois et origines de l'Electr. atmosph.* Luigi Palmieri, p. 48.

naissance aux nuages orageux d'où partent des décharges disruptives, dans la saison d'été, alors que les couches sèches de l'air environnant s'opposent à l'écoulement de l'électricité contenue dans ces nuages. Mais autre chose est de présenter cette condensation comme la cause qui détermine un orage ou élève le potentiel électrique en un point spécial, autre chose est de lui attribuer l'origine de l'électricité qui est venue s'accumuler dans ces vapeurs condensées. Il semble donc que si M. Palmieri est dans le vrai quand il trouve que l'évaporation produit l'électricité, on ne peut être d'accord avec lui pour voir dans la condensation des vapeurs la source immédiate de l'électricité atmosphérique.

M. Palmieri a invoqué l'opinion de M. Colladon, mais il a donné à sa théorie un sens plus étendu qu'elle ne voulait avoir. En effet, lorsque M. Colladon affirme que toute condensation et tout nuage qui se résoud en pluie est une source continue d'électricité, il veut dire que l'électricité des orages provient de cette condensation des vapeurs et de leur résolution en pluie ; mais, il fait venir ensuite cette électricité des hautes régions pour remplacer le fluide écoulé par cette pluie ou par les décharges de la foudre.

De plus : « Les expériences de M. Palmieri, dit M. Luvini, font voir que la charge des particules est tellement minime que même en réunissant ces dernières en une masse d'eau de plusieurs dizaines de grammes, elle est encore insignifiante ; tellement insignifiante qu'il faut employer les instruments les plus délicats pour la rendre sensible et encore est-il douteux qu'elle existe réellement (1) » puis il conclut ainsi : « Il ne reste plus à M. Palmieri que

(1) *Contribution à la Météorologie électrique*, J. Luvini, p. 46. Turin, 1888.

cette alternative : ou démontrer que l'évaporation d'un gramme d'eau et la condensation d'un gramme de vapeur produisent une quantité d'électricité telle qu'on en puisse tirer des étincelles, ou renoncer à sa théorie de l'électrisation des nuages. »

Enfin, M. Edlund de Stockholm, adopte la théorie de l'évaporation et de la condensation des vapeurs, mais il ajoute que ces vapeurs transportent dans l'atmosphère l'électricité positive sous l'influence de l'induction unipolaire du magnétisme terrestre (1).

III. Emission

Lorsque la théorie du frottement fut abandonnée, une idée plus simple vint surgir dans l'esprit des observateurs. Pourquoi, en effet, disaient-ils, ne pas admettre la simple émission, un dégagement constant d'électricité passant de notre globe dans l'atmosphère? Ce fut l'avis de Bertholon; il exprima le premier cette hypothèse qui fut ensuite répétée, confirmée et développée par tant d'autres. Le P. Beccaria suppose « qu'il s'échappe de la terre une quantité de matière électrique dans quelqu'endroit où il y en a de surabondante et qu'elle monte dans les hautes régions (2). » Cette proposition, qui a été mise de côté pendant longtemps avec celle du frottement tandis qu'on s'occupait de l'évaporation, a été reprise de nos jours par les adversaires de ce dernier système. D'après le professeur Rowland, la terre serait naturellement électrisée d'une façon uniforme, s'il n'y avait pas de courants d'air dans la

(1) *Recherches sur l'électricité atmosphérique*, Edlund, 1878.
(2) *Lettere del Electrissismo*, p. 305.

partie inférieure de l'atmosphère qui accumulent l'électricité vers les pôles où elle produit les aurores boréales. Il resterait donc à l'équateur des régions moins électrisées où l'électricité tend à revenir et c'est pourquoi les orages y sont si fréquents. M. Rowland suppose une circulation continuelle d'électricité allant de l'équateur aux pôles pour revenir des pôles vers l'équateur.

Gaston Planté généralise sa théorie des corps célestes électrisés positivement et en arrive à regarder la terre comme chargée elle-même d'une électricité positive qui ne serait due, ni à l'évaporation ni au frottement, mais proviendrait d'une charge primitive ou provision d'électricité propre à la terre elle-même, emportée par elle à l'origine de sa formation et qui tendrait peu à peu à se dissiper de même que la chaleur qu'elle possède, avec une lenteur extrême en raison de sa masse.

D'après Planté, cette électricité se dégagerait donc par voie de simple émission du sol et des mers et produirait, en rayonnant de toute leur surface, divers effets dans l'atmosphère par suite des conditions météorologiques différentes que présentent les pôles et l'équateur. « Les vapeurs formées au dessus des mers, dit-il, nous paraissent constituer seulement un prolongement conducteur dans l'atmosphère de la masse liquide conductrice du globe de laquelle émane, par suite de sa tension, l'électricité positive. On s'explique ainsi que le dégagement d'électricité soit plus grand au-dessus des mers qu'au dessus de la croûte solide du globe, La vapeur d'eau facilite la diffusion de l'électricité dans l'air, qui, à la pression ordinaire, se comporte comme un corps isolant (1). »

(1) *Phénomènes électriques de l'atmosphère*, Planté, 1888.

Cette théorie nous semble préférable aux autres. En effet, on ne peut croire que l'évaporation, le frottement produisent à *eux seuls* ce flux si intense d'électricité atmosphérique; il fallait nécessairement un foyer électrique dont l'activité puisse fournir à l'atmosphère le fluide dont elle se montre souvent si prodigue. Mais est-il nécessaire, comme le fait Planté, de faire intervenir cette charge électrique que la terre aurait conservée depuis sa formation? Ne se passe-t-il pas dans sa masse interne des phénomènes de toutes sortes dont la grandeur est suffisante pour lui renouveler cette provision et fournir une intensité électrique aussi forte que l'on voudra? Malgré l'émission qui se fait toujours, des courants la sillonnent et peuvent encore donner naissance à des effets considérables. Il faut peut-être ajouter aussi l'électricité qui s'échappe par émission de tous les corps célestes. Comme nous l'ont fait pressentir les travaux de Planté, Becquerel avait déjà pensé que les protubérances rosées du soleil devaient être regardées comme autant de foyers électriques dont l'électricité passerait facilement à travers les espaces raréfiés et conducteurs pour arriver à notre atmosphère et y pénétrer avec un potentiel qui irait en diminuant jusqu'au sol à mesure que la densité atmosphérique augmente.

C'était aussi l'avis de Peltier dont la théorie a été soutenue par MM. Pellat et Exner. Selon Peltier, l'électricité positive nous vient des espaces interplanétaires et notre globe est électrisé négativement, ce qui donne ainsi les deux signes de l'électricité nécessaire à une reconstitution soit brusque soit silencieuse.

M. Pellat considère les causes qui tendent à porter l'électricité négative du sol dans l'atmosphère; en particulier, quand un nuage se forme à la surface du sol, l'électricité

de cette surface passe à la partie supérieure du nuage et lorsque le nuage se dissipe son électricité négative est transportée dans l'atmosphère. Des phénomènes se produisent fréquemment et l'air qui nous environne, dit-il, doit avoir une certaine charge négative, puis il se résume ainsi : « S'il existe des causes qui tendent à faire passer la couche électrique négative du sol dans l'atmosphère (brouillards, aurores polaires), il en existe d'autres (la pluie) qui ramènent constamment l'électricité négative de l'atmosphère au sol (1).

Ces diverses propositions nous amènent à la discussion d'une question connexe qui reste à éclaircir, celle du signe que l'on doit attribuer à l'électricité du sol. M. Palmieri a étudié et traité longuement cette question. Pour lui, l'électricité atmosphérique est positive et l'électricité terrestre, négative; la première est inductrice, la seconde induite. Le savant italien ne met pas en doute que l'électricité du sol soit négative ainsi que de nombreux observateurs l'ont affirmé, et il réussit à démontrer par des expériences répétées que le sol est chargé négativement quand le potentiel atmosphérique est positif.

Passons à la deuxième partie de sa proposition; il recherche où se trouve l'électricité inductrice : dans l'atmosphère ou dans le sol. Il rappelle d'abord que si un conducteur isolé est placé sous l'influence d'un corps électrisé et de manière qu'il ait les pointes dont il est armé tournées vers le corps, le conducteur induit se charge de la même électricité que celle de l'inducteur et aux dépens de celle-ci comme si l'induit était mis en communication avec l'inducteur. « Cela établi, dit-il, si nous exposons à l'air libre un

(1) *Leçons sur l'électricité*, Pellat, p. 357, 1890.

conducteur vertical isolé, muni de pointes à son extrémité supérieure, nous obtiendrons de l'électricité positive par des temps ordinaires. Si nous supposons maintenant que l'électricité inductrice soit l'électricité négative du sol, en renversant le conducteur avec les pointes dirigées vers le bas, nous devrions observer sur lui de l'électricité négative, ce qui ne se produit nullement, car de toutes mes expériences il résulte que l'on ne constate alors que la présence d'une faible quantité d'électricité positive ou même absolument rien (1). »

Ce renseignement nous est précieux et nous fera admettre la théorie de Planté. En effet, ce conducteur à pointes tournées vers la terre qui se charge d'électricité positive, n'est-ce pas pour nous une démonstration évidente que l'électricité terrestre est positive, et que, par suite, étant de même signe que celle de l'atmosphère, elle s'échappe du sol par voie de simple émission ?

Mais comment des décharges peuvent-elles s'établir entre les nuages positifs et la terre positive? Gaston Planté nous explique cette apparente contradiction : « Cette difficulté se résoud facilement si l'on considère qu'une portion donnée de la surface du sol, tout en émettant de l'électricité positive en est beaucoup moins chargée que les amas nuageux qui passent au dessus après avoir récolté et emmagasiné, sur leur parcours, l'électricité positive répandue dans l'air et apportant aussi une grande partie de celle qu'ils ont prise lors de sa formation, au dessus des mers, dans les régions chaudes. »

« Il en résulte que cette portion du sol, n'ayant qu'une tendance positive relativement faible devient *par influence*

(1) *Acad. des Sciences de Naples* (Séance du 1er mai 1886) et *Revue Intern., de l'Élect.*, T. IV, p. 254.

fortement négative. Les choses se passent comme entre les nuages eux-mêmes qui peuvent être tous électrisés positivement et sont néanmoins le siége de violentes décharges parce qu'ils sont électrisés à des degrés différents (1), » et Planté rappelle avec Quételet et M. Palmieri que les nuages qui semblent négatifs dans leur ensemble le sont seulement par influence et à l'une de leurs extrémités.

Après l'exposé et la discussion de ces principales théories, il nous paraît possible de nous résumer en disant que l'électricité positive se dégage en abondance de notre globe par voie d'émission sous l'influence de causes multiples, de mille phénomènes secondaires, évaporation, frottement, actions chimiques, condensation; elle se distribue inégalement à la surface terrestre et s'accumule aux pointes; des recompositions, des réactions nombreuses s'opèrent et viennent augmenter, diminuer, modifier continuellement le potentiel atmosphérique et ce sont les plus importantes de ces variations que nos faibles instruments essaient d'enregistrer. Mais comme l'électricité tend à se porter à la surface des corps suivant la loi connue, elle s'élève dans l'atmosphère, monte vers les hautes régions et s'en va rejoindre par un courant ininterrompu l'électricité qui se dégage sans cesse de tous les mondes célestes.

(1) *Phénom. Élect. de l'Atm.* G. Planté, 1888.

CHAPITRE II

ORAGES

Le baromètre a baissé brusquement, la colonne de mercure est à 0,740*m*., le vent est faible et ne se fait guère sentir à la surface du sol; la chaleur a augmenté, la pureté du ciel s'altère et l'on voit apparaître ça et là de nombreux cumulus : leurs contours mamelonnés, curvilignes, sont nettement arrêtés. Bientôt la plupart se rejoignent, s'enchevêtrent et en dépit de toutes ces transformations, ils restent invariablement liés par leur base à un épais rideau de vapeurs noirâtres qui vient de l'horizon, du sud-ouest, et recouvre d'une teinte uniforme les cumulus encore épars. Un nuage d'aspect plus sombre à reflets rougeâtres vient s'ajouter au premier et tout semble alors se confondre. Cependant, des déchirements se produisent, des teintes plus pâles apparaissent dans la voûte noire et de petits nuages légers courent incertains dans plusieurs directions contraires. De sourds grondements se font entendre, quelques lueurs apparaissent déjà, elles entr'ouvrent la nue qui se referme aussitôt, puis de larges gouttes tombent isolées, mais elles arrivent à peine jusqu'au sol et ne peuvent dissiper la lourde chaleur qui pèse à sa surface, elles sont vapo-

risées avant de le toucher ; d'autres plus serrées succèdent aux premières, elles augmentent, elles se réunissent, se précipitent et une large voie humide réunit bientôt le nimbus à la terre. Tout d'un coup un trait bleuâtre sillonne l'espace et en même temps un coup strident, une détonation violente retentit : c'est la foudre (fig. 21). Un instant après, elle éclate de nouveau, les éclairs se croisent, les décharges se multiplient, l'orage est dans toute sa force, mais bientôt cédant au courant qui l'entraîne il va plus loin porter ses ravages.

Les descriptions d'un orage sont toutes forcément à peu près les mêmes, quelque système que l'on adopte pour en expliquer le principe et à part certaines remarques nouvelles, elles varient peu, qu'elles soient données par Beccaria, Arago, ou M. Colladon. Mais il ne suffit pas de constater la présence des orages et de les décrire, il faut encore en expliquer le mécanisme, montrer la formation des nuages orageux, leur mode de charge électrique, le fonctionnement de la décharge. Ces diverses questions complètent pour ainsi dire les théories sur l'origine de l'électricité atmosphérique et commencent l'étude de ses manifestations ; nous y voyons naître de nouvelles discussions et nous retrouvons les mêmes théoriciens et presque les mêmes difficultés.

Il faut dire, cependant, que les divergences d'opinion sont moins grandes, moins prononcées, moins nombreuses. Car ici les observations sont plus concluantes que lorsqu'il s'agissait d'établir des théories sur de simples suppositions plus ou moins fondées. Le raisonnement se trouve renfermé dans des limites plus déterminées, il est moins abstrait et sa marche est guidée par des faits qui jalonnent sa route et la rendent plus sûre.

Fig. 21.

I. Formation des nuages orageux.

C'est à 3000 mètres environ, dans la région des cumulo-stratus qu'il faut chercher l'origine des orages. D'après Hutton la réunion des nuages orageux proviendrait de la présence de deux courants d'air chargés d'humidité ayant des températures différentes et des directions contraires. Gay-Lussac a adopté cette opinion (1) comme la plupart des météorologistes. Suivant Kaemtz et M. Palmieri, la charge électrique de ces nuages est proportionnelle à leur degré de condensation. Enfin Du Moncel ajoute comme condition nécessaire à la formation des orages l'influence d'une température très élevée dans les couches basses de l'atmosphère qui accumule dans les hautes régions les vapeurs en un espace limité.

M. Ch. Jundel se sépare presque entièrement de ses devanciers; il s'appuie sur cette remarque que les orages sont beaucoup plus fréquents pendant les heures de chaleur de la deuxième partie du jour et pense qu'il se produit au-dessus des surfaces continentales échauffées une sorte de dilatation des couches inférieures; cet effet se communique de proche en proche, surélève les couches plus hautes au-dessus de leur niveau et ce sera un courant ascendant qui viendra heurter les courants rapides supérieurs pour former un tourbillon d'où naîtront les amas nuageux et l'orage (2). C'est aussi en quelque sorte la théorie de M. Siemens; il suppose dans l'atmosphère un renversement des densités produit d'abord dans les couches basses dont les

(1) *Annales de chimie et de phys.* T. VIII, p. 158.
(2) *Comptes rendus de l'Acad. des Sciences pour 1877*, T. I, p. 568.

vapeurs surchauffées par la température ne demandent qu'à monter; si cette sorte d'équilibre instable est troublé en un point par une cause quelconque, par exemple par la colonne de fumée qui s'élève d'une cheminée, l'air inférieur se précipite horizontalement vers la base de cette colonne et l'air chaud et humide monte dans les airs en une colonne gyratoire de plus en plus vaste qui va former dans les régions supérieures des nuages orageux.

M. Faye combat cette théorie et fait observer qu'il serait trop facile de provoquer des orages artificiels : « puisqu'il suffirait, dit-il, d'une atmosphère calme, légèrement surchauffée en bas et d'y allumer un feu de paille dont la fumée donnerait la première impulsion. A Naples, le Vésuve est là en permanence pour remplir cet office par sa colonne ascendante de vapeurs surchauffées et dans l'état susdit d'équilibre instable il devrait donc se former un orage grâce à l'appel puissant de cette colonne ascendante. Je n'ai pas besoin de dire qu'il ne s'en forme jamais et qu'à Naples comme ailleurs les orages arrivent tout formés, ils disparaissent ou plutôt ils s'éloignent de même sans relation aucune avec le Vésuve (1) ».

Espy assure cependant que les Floridiens provoquent des orages en allumant des feux dans leurs prairies d'herbages (2). Quoiqu'il en soit, pour M. Faye les orages proviennent uniquement de mouvements gyratoires descendants à axes exclusivement verticaux qui naissent dans les courants supérieurs de notre atmosphère (3).

M. Pellat, également partisan des tourbillons aériens, principe de l'orage, considère une machine électrique à

(1) *Comptes rendus de l'Acad. des Sciences* pour 1880. T. II, p. 708.
(2) *Rev. Intern. de l'Élect.*, T. III, *1886*, p. 49.
(3) *Comptes rendus de l'Acad. des Sciences* pour 1881. T. II, p. 645.

influence dans laquelle un ou plusieurs plateaux isolants, tournant avec rapidité devant des inducteurs fixes ou mobiles, augmentent de plus en plus les charges de corps conducteurs ou semi conducteurs jusqu'à ce que les étincelles éclatent.

« Qu'y a-t-il de plus analogue à une de ces machines à influence, dit-il, qu'un tourbillon d'air, corps mauvais conducteur, entraînant des nuages électrisés devant d'autres nuages relativement fixes (1) ».

De même d'après M. Luvini les deux facteurs principaux qui concourent à la formation d'un orage sont : 1° une masse d'air avec une quantité suffisante de vapeur d'eau ; 2° une ou plusieurs trombes à axe vertical (2). Il explique de cette manière, comme le fait M. Faye, les cyclones, les typhons, les tornades et les trombes. Nous étudierons ces divers phénomènes et nous verrons que si l'on admet les tourbillons de M. Faye, ces tourbillons peuvent encore provenir d'une action électrique (3).

En tous cas, que l'on adopte l'une ou l'autre de ces théories, on peut décrire comme il suit les principes et le fonctionnement d'un orage dans nos contrées.

Lorsqu'un courant d'air froid amène la condensation des vapeurs et qu'un vent tiède et chargé de l'humidité de l'Océan vient activer cette condensation, il se forme dans la région des cumulus (fig. 22) un amoncellement de masses nuageuses et l'électricité atmosphérique, trouvant un conducteur, s'accumule à la surface des globules vésiculaires. Si les globules sont peu rapprochés et que la condensation des vapeurs soit faible, il n'y a aucun changement appréciable et l'électricité contenue dans le nuage peut s'écouler de nouveau dans l'atmosphère avec les pluies ou les brouillards, enfin par toutes les voies suffisamment humides et conductrices qui lui sont ouvertes pendant l'hiver ; mais en été, dans la saison chaude, l'air sec vient s'interposer comme isolant entre les nuages, et la tension électrique s'élève dans chaque vésicule d'eau ; il arrive un instant où l'on peut regarder le nuage, à cause de son extrême densité, comme

(1) *Leçons sur l'Electricité*, Pellat, p. 354, 1890.
(2) *Sette studi sopia l'elettric. Atm, le turbine, la grandine...* Giovani Luvini.
(3) Voir chapitre IV : *Grêle*, et chapitre V : *Trombes et Cyclones*.

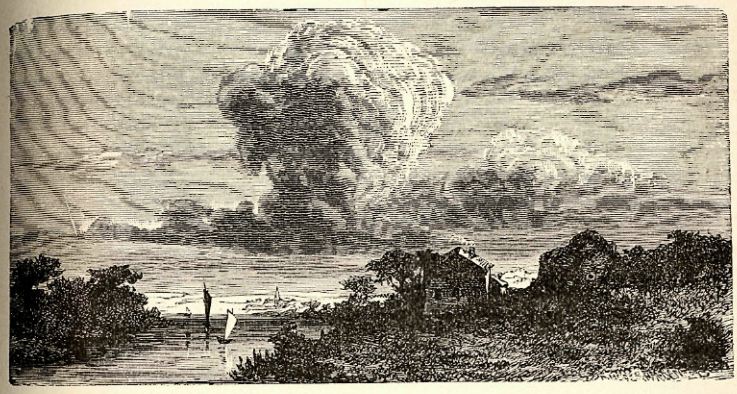

Fig. 22.

un conducteur presque parfait et l'électricité de chaque vésicule se porte à la surface de ce conducteur où elle est maintenue en équilibre par l'air extérieur. Si le nuage a une certaine étendue, il est donc facile de concevoir comment une faible quantité d'électricité, d'abord disséminée dans un grand espace sur toutes les particules nuageuses, acquiert une tension énorme quand elle se porte à la surface du nuage.

M. Colladon résume en ces quelques lignes la marche

du phénomène : « ...il est probable, dit-il, que le mode d'électrisation des nuages varie selon leur degré de condensation et les nombreuses modifications de leur constitution intérieure. Il est certain que quelques nuages très denses peuvent être considérés comme de véritables conducteurs, quoique formés probablement de milliards de petits centres qui peuvent être électrisés séparément mais qui tous dans un moment soit infiniment court, soit ayant une durée perceptible à nos sens peuvent perdre la presque totalité de leur tension électrique (1). »

Voilà donc les nuages électrisés positivement; ils ont acquis par le fait de leur condensation une tension positive et ils ont emprunté cette électricité à l'atmosphère qui la reçoit de la terre. En présence les uns des autres, ces nuages, bien que tous électrisés positivement, ne sont pas nécessairement tous de la même densité et par suite n'ont pas le même potentiel électrique. Ceux qui possèdent le potentiel le plus élevé réagissent sur les autres et développent par influence à une de leurs extrémités de l'électricité négative. La même réaction s'exerce sur la terre et on a en présence une ou plusieurs charges d'électricité de signe contraire qui n'attendront plus que le moment favorable pour rétablir l'équilibre par une décharge : le grand courant électrique universel, un instant interrompu sur un point, reprendra bientôt sa marche.

Il n'y a donc plus besoin de rechercher avec Humbolt, Saussure, Tralles, Becquerel... et d'autres physiciens l'origine de l'électricité négative. Ils la font venir de l'eau des cascades qui en tombant sur les rochers s'éparpille en globules vésiculaires et emporte dans l'atmosphère l'électricité

(1) *Comptes rendus de l'Acad. des Sciences* pour 1886, T. I, et *Lumière électrique*, 1886, T. XX, p. 213.

négative dérobée au sol par le frottement (1) ou bien encore de ces nuages qu'ils appelaient *parasites* et qui flottent indécis au sommet des montagnes, s'y attachent un instant pour être ensuite repoussés, lorsqu'ils sont chargés d'électricité négative. Sans rejeter les témoignages et les observations de ces savants, on peut cependant supposer qu'ils se sont trompés sur le signe de l'électricité du sol et nous ne devons voir dans ces attractions, ces frottements et ces répulsions que des phénomènes secondaires qui n'auront qu'une importance relative dans la formation des nuages orageux et dans leur électrisation. Il en est de même des petits nuages blancs effiloqués que Beccaria appelait des *ascitizi* ou nuages additionnels qui apparaissent au dessous du nimbus orageux, animés de mouvements brusques et indécis et auxquels il fait jouer un rôle encore trop important. Il suffit de considérer l'influence que peuvent avoir des nuages positifs à potentiel élevé sur d'autres amas nuageux ou sur le sol positif pour déterminer la formation momentanée d'une charge équivalente d'électricité négative.

II. Hauteur et constitution des nuages orageux

La hauteur des nuages orageux est très variable ; Humbolt les croit fort élevés car il a pu constater les traces de la foudre sur le Toluca à 4620 mètres d'altitude (2), Coulvier-Grandier leur assigne un maximum de 4500 mètres; Bouguer et La Condamine essuyèrent un orage sur le Pichencha, un des sommets de la Cordillère, à 4868 mètres; Saussure à 3471 au col du Géant; Peytier et Hossard à

(1) *Cosmos*, T. I, p. 571.
(2) *Idem*, T I. p. 49.

3000 mètres; Delisle, Kaemtz citent des orages qui ont éclaté à 2000 mètres, d'autres à 1400, à 1000 mètres... On peut d'ailleurs en signaler à toutes les hauteurs mais il ne faut pas croire que ces chiffres représentent exactement l'élévation des nuages orageux au dessus de la plaine, car les vapeurs suivent quelque peu les dépressions du sol et ne s'étendent pas toujours en couches parfaitement horizontales par rapport au niveau de la mer. On ne peut donc pas dire que la hauteur moyenne des cumulus soit de 4000 mètres, parce que la foudre a éclaté à cette altitude sur le sommet de hautes montagnes; les nuages peuvent y être entraînés par les courants d'air ascendants qui se produisent souvent sur les rampes escarpées et qui emportent ainsi l'orage à de telles hauteurs.

De plus, ces amas nuageux ne se composent pas seulement d'une seule couche de vapeur: ce sont au contraire des amoncellements qui partent de très bas pour s'élever très haut et la décharge se produit ici ou là suivant les divers degrés de condensation; comme nous le dit Arago : « alors qu'une couche de nuages semble parfaitement unie à sa surface inférieure, la face opposée n'est qu'un composé de très hautes protubérances et de profondes cavités (1). » Et nous trouverons même dans la constitution de ce chaos nuageux la cause des coups de foudre répétés qui partent souvent du même point alors qu'il semblerait que la chute du potentiel dût être définitive après une première décharge.

En effet, si un seul nuage peut être considéré, nous l'avons dit, comme un conducteur presque parfait, il n'en est pas de même d'un ensemble nuageux, des intervalles séparent toujours les groupes de globules vésiculaires et

(1) *Notice sur le tonnerre*, Arago, p. 228.

« c'est là, dit Becquerel, la cause des nombreuses étincelles qui nous semblent partir du même point (1). » Et même d'après Francklin « un nuage isolé ne saurait être orageux » Saussure nous dit aussi à ce sujet : « Tant que nous ne voyions dans l'air ou à la cime du mont Blanc qu'un seul nuage quelque dense et quelqu'obscur qu'il paraisse il n'en sortait jamais de tonnerre, mais s'il s'en formait deux couches l'une au dessus de l'autre ou s'il en montait des plaines ou des vallées qui vinssent atteindre ceux qui occupaient les cimes, leur rencontre était signalée par des coups de vent, de tonnerre, de la grêle et de la pluie. »

Il est évident, en résumé, qu'il y a dans cet amas de vapeur, ininterrompu en apparence, des espaces secs qui isolent chaque centre électrique et la décharge de l'un ne fait au contraire qu'élever le potentiel de l'autre.

Les expériences multipliées de G. Planté lui permettent encore d'ajouter de nouveaux détails aux observations des météorologistes. Si dans le circuit d'une batterie secondaire et de tubes à air raréfié, on dispose des peignes de papier à filtrer, humecté d'eau distillée, les tubes s'illuminent et des lueurs y apparaissent avec des intermittences spontanées jusqu'à ce que la batterie soit entièrement déchargée. Il assimile donc avec raison les résultats de cette expérience aux phénomènes électriques des orages et aux décharges multipliées qui éclatent au sein d'une même masse nuageuse, alors que les éclairs jaillissent entre des lambeaux de vapeur condensée plus ou moins séparés par des milieux plus ou moins conducteurs et « l'électricité, par sa puissance calorifique, vaporise immédiatement les extrémités humides des deux portions de nuages électrisés

(1) *Traité d'électricité*, Becquerel, T. IV, p. 126.

et produit le vide nécessaire pour que la décharge apparaisse à l'état lumineux (1). »

La pluie qui accompagne les orages serait, suivant M. Colladon, la cause de ce renouvellement constant de l'électricité des nuages; le vide laissé par la chute de la pluie produirait un appel d'air des hautes régions et l'électricité affluerait de nouveau dans le nuage orageux. Si l'on joignait à cette observation celle de Beccaria qui fait dériver la pluie de l'électricité on se trouverait menacé d'un orage indéfini : la pluie amenant l'électricité et cette dernière, la pluie. Tout en remarquant la justesse des expériences de M. Colladon, l'appel d'air et d'électricité produit par la pluie n'est pas assez considérable pour renouveler la tension électrique des nuages qui se déchargent peu à peu ainsi que nous l'avons dit et qui peuvent se recharger en recueillant sur leur parcours l'électricité atmosphérique, des espaces qu'ils traversent.

De plus, cette pluie ne vient pas toujours pendant les orages, au moment opportun, affirmer la constante exactitude de la théorie de M. Colladon. En 1888, M. Muller, professeur au lycée impérial russe, écrivait à la Société de géographie que dans l'orage du 29 juillet à Tackhend, de larges éclairs avaient sillonné les nuages pendant trois heures consécutives sans une seule goutte de pluie (2).

On peut encore lire dans la chronique météorologique de la *Nature* les lignes suivantes :

« En France, nous devons d'abord parler de l'orage qui a éclaté à Saint-Maur, le dimanche soir 22 juillet 1888. Cet orage d'une violence extrême offre cette particularité qu'il a précédé de quelques heures une éclipse totale de lune

(1) *Phénom. Elect. de l'Atm.* G. Planté. *Note de la page* 167.
(2) *La Nature, 1888,* T. II, p. 415.

dont le commencement seul était visible à Paris, car elle a commencé très peu de temps avant le lever du soleil. Les éclairs ont été innombrables ainsi que les coups de foudre. On a observé des phénomènes très singuliers. Le sillon des éclairs était très souvent horizontal et ramifié. On a aperçu à différentes reprises plusieurs éclairs cheminant dans des directions parallèles et d'autres éclairs pelotonnés et enroulés sur eux-mêmes comme des soleils d'artifice. *La pluie était peu abondante*, mais le temps est resté très orageux. »

Cependant, la pluie n'en joue pas moins un rôle important dans le phénomène des décharges atmosphériques. Voici d'abord l'avis de M. Palmieri : « On peut être certain que les tensions électriques extraordinaires sont produites par une brusque résolution de nuages en eau. Par suite on devra considérer le nuage qui se résoud en pluie comme une source continue d'électricité qui, lorsqu'elle ne peut se dissiper par l'humidité de l'air ambiant, se décharge sous forme de foudre, soit entre les nuages, soit entre les nuages et le sol placé au dessous.

« Ces puissantes tensions naissent au commencement de la pluie, durent et finissent comme elle » (1).

Puis c'est M. Hauvel qui, dans une communication au congrès des sociétés savantes à la Sorbonne, fait remarquer que la pluie provient d'une couche de nuages élevés, procède par rafales et détermine des coups de foudre au moment où les rafales traversent une deuxième couche de nuages situés plus près du sol (2). M. Plumandon, météorologiste au Puy de Dôme, résume ainsi ses observations : « l'orage va éclater et l'on voit des traînées noires divisées en raies ou stries s'échapper verticalement de bas en haut

(1) *Lois et origines de l'électricité atmosph.* L. Palmieri.
(2) *Cosmos*, Avril 1887.

INSTITUTO DE FÍSICA DA U.F.R.G.S. BIBLIOTECA

en dessous de la base sombre de la masse nuageuse ; c'est la pluie qui commence » (1) et aussitôt après la foudre éclate. John West, l'aéronaute américain, assure que le moment des plus fortes décharges électriques coïncide avec le commencement des plus grandes averses.

En résumé, on peut dire que l'épuisement de la charge totale de l'ensemble nuageux est activé par la pluie qui ramène à la terre l'électricité atmosphérique et complète silencieusement l'action des décharges disruptives. C'est pourquoi dans un orage, à la chute de la pluie, on constatera d'abord un redoublement de coups de foudre qui viendront suivre la voie humide tracée et frapper le sol, mais ils diminueront ensuite brusquement d'intensité lorsque toute l'électricité de l'amas nuageux sera dissipée et par les décharges et par la pluie.

III. Distribution des orages.

Nous n'avons qu'à nous rappeler la distribution de l'électricité atmosphérique à la surface terrestre et nous saurons immédiatement comment se distribuent géographiquement les orages ; ils sont de plus en plus rares à mesure qu'on s'élève en latitude ; les témoignages sont nombreux ; Philips, Scoresby, Parry et tous les explorateurs des régions polaires nous affirment qu'il ne tonne jamais au-delà du 75e degré et que le tonnerre se fait rarement entendre entre le 70e et le 75e. Le capitaine Franklin signale un seul jour orageux, le 29 mai 1826, par 67° 10' et M. Thortensen, médecin de Reikiawick, en Islande, note aussi un seul orage en 1835.

(1) *La Nature*, 1884, T. II, p. 173.

Si nous descendons en Europe et de là dans les pays chauds nous voyons les jours d'orage augmenter peu à peu à mesure que l'on se rapproche de l'équateur.

St-Pétersbourg, Londres....	moyenne de	9 jours
Paris.....	—	15 —
Berlin.....	—	18 —
Pithiviers, Orléans.....	—	21 —
Smyrne.....	—	23 —
Québec.....	—	24 —
Martinique.....	—	40 —
Maryland.....	—	41 —
Abyssinie.....	—	43 —
Rio de Janeiro.....	—	56 —
Patna (Inde).....	—	57 —
Calcutta.....	—	60 —

Enfin, entre le 4° et le 10° degré de latitude nord, les orages sont des plus fréquents et la moyenne annuelle atteint 70 jours orageux. D'après Boussingault il faut se représenter l'atmosphère de l'équateur comme sillonnée continuellement, pendant la saison d'été, par le feu électrique.

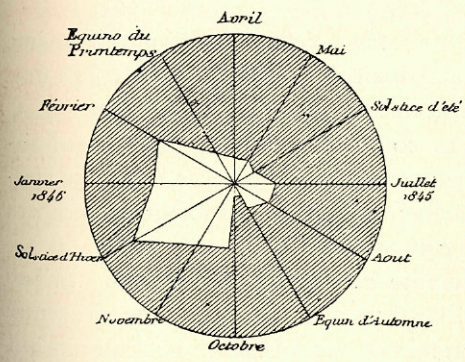

Fig. 23

En plus de ces observations générales, on doit remarquer que certains points de notre globe possèdent des tensions orageuses particulières : à la Jamaïque, d'après Hutchison, depuis le 1er novembre jusqu'au milieu d'avril, les sommets des

montagnes commençent à se couvrir de nuages tous les jours vers 11 heures ou midi, l'orage éclate et à 1 heure et 1/2 environ, le ciel est redevenu serein (1). Dans les vallées voisines de Quito, à Popoyan, les orages sont continuels et pendant 6 mois il n'y a pas moins de 20 à 25 jours orageux par mois. M. d'Abbadie relève en Ethiopie une moyenne annuelle de 200 jours d'orage et en 1845-1846 cette moyenne s'est élevée à 246 jours qui se répartissent comme il suit entre les divers mois (fig. 23).

Juillet 1845.....	24	Janvier 1846.....	14
Aout.....	27	Février.....	15
Septembre.....	29	Mars.....	20
Octobre.....	16	Avril	27
Novembre.....	14	Mai.....	28
Décembre	4	Juin	28

Et comme plusieurs orages éclatent souvent le même jour M. d'Abbadie arrive au chiffre incroyable de 533 orages observés en une année (2).

Il faut évidemment compter avec la nature du sol au-dessus duquel se forme et éclate l'orage car la charge électrique développée dans un terrain conducteur se dissipera plus facilement que celle d'un terrain isolant.

C'est à une cause toute géologique que Arago attribue une partie de ces inégalités de tensions observées entre deux points très rapprochés. Les orages plus fréquents qui se manifestent, par exemple, aux environs d'Orléans auraient pour cause le peu de conductibilité de leurs terrains cal-

(1) *On Meteorology*, Graham Hutchison, Glascow, 1835.
(2) *Mémoire des savants étrangers* T. XVI, *Mémoire sur le Tonnerre en Ethiopie*, Antoine d'Abbadie.

caires qui n'affleurent au contraire, dans le bassin parisien, que sur quelques points isolés.

Lewis Weston Dilwyn vient appuyer cette observation en faisant remarquer que les terrains conducteurs sont peu favorables à la formation des orages et que la richesse du sol en mines métalliques particulièrement peut être considérée comme un préservatif. Il nous donne les renseignements suivants :

Est de Devon. — Orages très fréquents. — Pas de mines ;

Sud de Devon. — Orages fréquents. — Peu de mines métalliques ;

Devonshire. — Orages moins fréquents. — Mines assez nombreuses ;

Cornouailles. — Orages peu fréquents. — Pays de mines ;

Environs de Swansea. — Orages très rares. — Grande abondance de mines de fer.

Puis Blavier, ingénieur des mines, nous apprend qu'au dessus des masses considérables de diorites grenues qui renferment une grande quantité de fer, à Niort, par exemple, les orages se dissipent presque toujours.

Ces observations semblent rationnelles pour les pays généralement humides où la charge d'électricité du sol, développée par le nuage orageux et facilement amenée dans les terrains conducteurs de la mine, peut s'écouler soit par l'atmosphère humide, soit par les terrains qui ont conservé l'humidité des jours de pluie ; mais ce qui est une sauvegarde peut devenir un danger dans certains pays plus chauds et dans les terrains plus secs. Cela expliquerait les remarques si opposées aux précédentes de M. Vicat, ingénieur des ponts et chaussées. Il dit qu'une seule journée

de juillet et d'août se passe rarement sans qu'un nuage électrique se forme au dessus des mines de fer de Grandone près de Gênes et vienne à éclater. Les mineurs avertis par l'expérience jugent qu'il est temps de quitter la place ; ils se retirent à quelque distance et reviennent à leur travail après l'explosion (1).

On voit que dans ce cas l'orage est rapide et on peut expliquer ce phénomène particulier en disant que la chute du potentiel dans un terrain isolant est bien moins brusque et moins complète que dans un terrain conducteur.

IV. Variations des orages

Le nombre des orages n'a-t-il jamais notablement varié dans une même région? Les météorologistes ont souvent étudié cette question et ont recherché s'il y avait une diminution ou une augmentation dans le nombre des orages.

En Belgique, M. Lancaster (2) a constaté pour la période de :

1833 à 1847.....	97 orages,	d'où une moyenne annuelle de		13,1
1848 1862.....	256	—	—	17,1
1863 1877.....	289	—	—	19,3

Ce qui prouverait une augmentation régulière depuis un demi siècle ; Von Bezold, Weber en Allemagne ont obtenu des résultats analogues ; en Bavière, le nombre aurait triplé, quintuplé pour la Saxe. Enfin, d'après un travail de M. Andriès publié dans les *Mitteilungen de Petermann* la moyenne aurait monté en Allemagne de 1 à 2,75 entre 1854 et 1877.

(1) *Causeries scientifiques*, de Parville, 1877, p. 279.
(2) *Ciel et Terre*. T. IV, page 339 et T. V, page 253.

Mais, d'un autre côté, de nombreux écrivains nous assurent que cet accroissement des orages n'est pas réel ; nous serions assez portés à le croire. Il se peut en effet que les premières statistiques déjà anciennes pour nous n'aient pas été dressées avec tout le soin que l'on y apporte aujourd'hui. Car pendant ces dernières années les recherches scientifiques deviennent de plus en plus minutieuses, de sorte que la multiplicité des observations et des faits signalés, les chroniques détaillées de météorologie publiées dans d'innombrables revues et la facilité des communications sont peut-être les seules causes de cette apparente augmentation des orages.

Becquerel croit au contraire à une diminution ; M. Discher l'affirme mais il ajoute que si la fréquence des orages diminue, le danger de la foudre augmente (1). MM. Holtz et Karsten, qui sont de cet avis, en voient la raison dans les déboisements si nombreux que l'on opère partout et qui détruisent tant de paratonnerres naturels pour attirer sur les villes et les villages, c'est-à-dire aux endroits peuplés, la foudre et ses terribles effets. M. Discher croit de plus que les masses métalliques employées aujourd'hui dans la construction des bâtiments ont aussi une influence sur le nombre et la violence des orages. Enfin M. Andriès appelle justement notre attention sur la quantité toujours croissante des fabriques qui lancent dans l'air des fumées chargées de poussières et créent ainsi une atmosphère lourde, une sorte de brouillard permanent toujours suspendu au dessus des villes industrielles.

Or les expériences de Nahrwold démontrent suffisamment, et cela paraît clair pour tout le monde, qu'un air ainsi chargé est particulièrement bon conducteur d'électricité.

(1) *Poste austro-hongroise, 1884,* n° 25.

Les poussières de l'air sont, en effet, composées en grande partie de particules métalliques. M. Tissandier en évalue la proportion à 2/3. M. Nordenskjold, dans ses explorations polaires, remarqua sur la neige un dépôt de poussières ferrugineuses qui ne pouvaient provenir, d'après lui, que de la chute de météorites. M. de Parville en trouve encore une autre source : « la boue qui sépare les pavés de nos rues, dit-il, est particulièrement riche en fer et cette poussière ferrugineuse provient surtout du sabot des chevaux, du bandage des roues de voitures, des cailloux ou sables à oxydes de fer. Il est vraisemblable que c'est à des causes analogues qu'il faut faire remonter l'origine du fer qui est en suspension dans l'air » (1). Et si nous ajoutons toutes les poussières métalliques des mines, usines, etc,.. comme nous l'avons déjà dit, nous verrons que la moyenne indiquée par M. Tissandier est loin d'être un maximum exagéré.

D'un autre côté pour l'écossais Aïtken la condensation de la vapeur d'eau en globules vésiculaires aurait pour condition essentielle la présence de poussières solides dans le milieu où ils se forment (2).

On voit donc par tout ce qui précède qu'il existe une étroite relation entre la présence de ces poussières et la formation des orages, de là même dépend souvent leur degré de violence, car d'après MM. Tissandier et de Parville, si l'horizon est plus clair lorsque le temps est à la pluie c'est que l'air augmentant la vapeur aqueuse alourdit les poussières et en débarrasse l'atmosphère. On peut donc en conclure que la pluie d'un premier orage, enlevant à l'atmosphère ses poussières conductrices, empêchera souvent la

(1) *Causeries scientifiques*, de Parville, 1875, p. 262.
(2) *Le Monde physique*, Guillemin, T. V, p. 260.

formation d'une nouvelle nuée orageuse et dans tous les cas, si elle se forme, en affaiblira les décharges.

V. Heures et saisons des orages.

Il est à peine nécessaire de parler de l'heure et de la saison des orages. Leur formation doit nécessairement commencer au moment des minima diurne et annuel relevés par les électromètres, c'est-à-dire au commencement de la deuxième partie de la journée et pendant la saison chaude.

M. Lancaster en désigne l'heure en disant qu'elle coïncide avec l'instant du maximum thermométrique et du minimum barométrique diurne. M. Eugen Riemann ajoute que le plus grand nombre des orages éclatent de 1 heure à 3 heures du soir et qu'un second maximum se produit vers 6 heures du soir (1).

Quant au mois, c'est une question de longitude aussi bien que de latitude. En Ecosse et dans les pays froids les orages sont plus fréquents en janvier que pendant les mois humides de l'été. En Islande il y a quelquefois plusieurs orages en hiver et il n'y en a jamais un dans la saison chaude. Suivant les Chinois « le tonnerre préside aux six premiers mois de l'année » (2). A Paris on note un maximum orageux en juin et il ne se rencontre qu'en août pour le midi de la France. En Afrique, le mois de septembre est le plus fécond en orages; enfin d'après Boussingault : « la saison des orages pour un lieu situé entre les tropiques commence précisément à l'époque où le soleil s'approche du zénith. Toutes les fois que la latitude d'un point de la

(1) *Annuaire de la Société de Météorologie de France*, 1888.
(2) *Journal Asiatique*, décembre 1840, p. 552.

zone équinoxiale et de même dénomination est égale à la déclinaison du soleil il doit se former un orage sur ce point. Dans de semblables circonstances, le ciel dans la matinée est souvent d'une pureté remarquable, l'air est calme, la chaleur du soleil insupportable ; vers midi, des nuages commencent à s'élever sur l'horizon... C'est toujours après la culmination du soleil que le tonnerre se fait entendre ; il est ordinairement précédé d'un vent léger et bientôt la pluie tombe par torrents. Or, il y a toujours à chaque instant sur la surface de la zone torride, quelle que soit la position que le soleil occupe dans l'écliptique, un point qui est placé dans les conditions sous lesquelles les orages se produisent infailliblement » (1).

Les orages dont la formation s'est faite lentement par suite de courants peu caractérisés, de l'humidité de l'air, ou d'autres causes analogues peuvent éclater vers la fin du jour ou dès le commencement de la nuit. Mais on conçoit que les conditions météorologiques nécessaires à la formation d'un orage se rencontrent difficilement à la fin de la nuit ou pendant l'hiver ; aussi des orages éclatant à cette heure ou pendant cette saison sont-ils comptés et considérés comme de rares exceptions.

En outre, lorsqu'ils se produisent, ils sont rapides et le plus souvent se résument en une seule décharge ; il est vrai que s'il faut en croire certains météorologistes, Mohn par exemple, ils sont plus terribles que les orages d'été, (2) parce que les nuages sont plus bas pendant la saison froide. Le 4 février 1887, M. Debar, de Fécamp, communiquait à la Société des ingénieurs civils de Paris, l'observation suivante : Le 9 janvier, à 10 heures du soir, le temps était

(1) *Annales de Chim. et de Phy*. T. LVII, p. 180.
(2) *Météorologie*, Mohn, p. 422. 1884,

d'un calme parfait, état assez rare sur nos côtes de la Manche, aucun des indices habituels ne décélait la proximité d'un orage, quand tout à coup le gaz est éteint, un éclair brille suivi d'une brusque et courte détonation, puis tout rentre dans le silence...

L'orage remarqué à Bordeaux, au mois de décembre de la même année, fut aussi court et on n'entendit guère que deux coups de tonnerre.

VI. Orages volcaniques

Nous devons dire quelques mots des orages volcaniques dont les caractères distinctifs ont été tracés par M. Faye. L'énorme quantité de vapeur d'eau lancée par un cratère se condense en colonne nuageuse et donne naissance à des orages produits, suivant l'expression originale du savant académicien, « par le soleil encroûté que nous foulons aux pieds, et qu'il ne faut pas confondre avec les orages dus à l'action du soleil extérieur. »

Ils diffèrent entre eux :

1° Parce qu'en examinant de près comme de loin la colonne ascendante du Vésuve, M. Faye n'a pu trouver trace de mouvements gyratoires : « les énormes flocons de nuages qui s'en échappent, dit-il, paraissent bien tourbillonner ; mais ce sont des mouvements confus, tumultueux (1). »

2° L'orage volcanique est immobile, il ne se déplace pas comme son congénère, il reste confiné dans la colonne de nuages ascendants et c'est toujours de cette colonne que jaillissent les éclairs.

(1) *Comptes rendus de l'Acad. des Sciences* pour 1880, T. II, p. 708.

Ces orages volcaniques ont été décrits par de nombreux observateurs. Pline en avait déjà parlé; et de nos jours, le P. Della Torre en 1812, Bracini en 1831, les signalent dans leurs ouvrages.

Arago dit à ce sujet : « Quant au développement de l'électricité par le travail intérieur des volcans, ce qui le

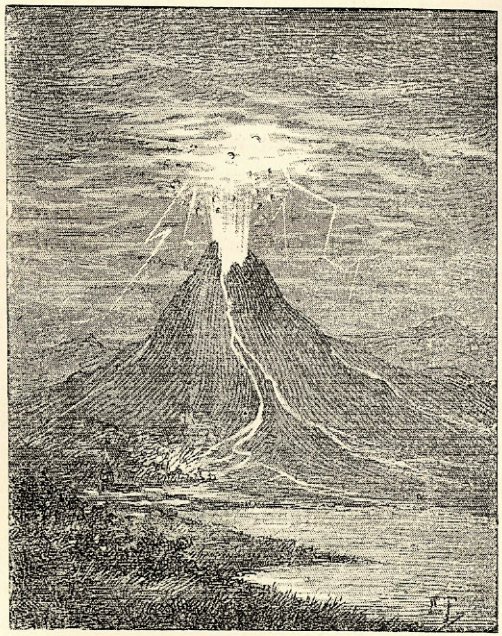

Fig. 24.

prouve ce sont ces nuages de poussières s'en échappant lors des éruptions et qui sont chargés d'une électricité donnant lieu à des éclairs serpentant en zigzags très brillants accompagnés de détonations comparables aux plus violents coups de tonnerre » (1) (fig. 24).

(1) *Notice sur le Tonnerre*, Arago.

On trouve dans le rapport de M. Van Sandick, ingénieur des ponts et chaussées à Padang, Sumatra, des détails intéressants sur la grande éruption volcanique du détroit de la Sonde qui a bouleversé, le 26 août 1883, les îles de Java et de Sumatra. Le steamer *Le Loudun* se trouva au milieu de la mer déchaînée qui se soulevait en lames monstrueuses et ne parvint pas à sortir de la baie de Lampong. Des cendres et des pierres ponces tombaient de tous côtés, l'atmosphère était fortement imprégnée d'acide sulfureux, toutes les poitrines étaient oppressées; la boussole avait des déviations brusques et l'aiguille sautait affolée dans toutes les directions : « A partir de onze heures du matin, *Le Loudun* fut soumis à une suite non interrompue de *tremblements de mer*, sorte de remous terribles qui jetaient le navire tantôt sur un flanc tantôt sur l'autre. Pendant ce temps les éclairs traversaient les ténèbres à courts intervalles, sept fois la foudre s'abattit sur le mât et chaque fois suivit le fil conducteur du paratonnerre pour se perdre dans les abîmes de la mer. En même temps sur les parties élevées du mât, sur les cordages, des flammes subites se mouvaient » (1).

M. Palmieri qui a longuement étudié tous les phénomènes du Vésuve rappelle que la fumée est constamment chargée d'électricité positive tandis que la cendre qui retombe donne de l'électricité négative (2). Il en conclut qu'on a toujours signalé des décharges électriques dans la partie moyenne de la colonne toutes les fois que la cendre est tombée en abondance des nuages supérieurs (3).

Enfin G. Planté qui, on se le rappelle, considère la terre comme un corps électrisé dans toute sa masse, démontre

(1) *La Nature*, 1884, T. I, p. 71.
(2) *Il Vesuvio e la sua storia*, Luigi Palmieri, Milano, 1880.
(3) *Lois et origines de l'élect. atm.*, Palmieri, p. 43.

aisément que cette électricité doit se dégager par voie d'éruption pour former les nuées volcaniques « toujours accompagnées, dit-il, d'éclairs et de tonnerre »(1).

VII. Relations entre les orages et les taches solaires

Les études qui établissaient une concordance entre les variations de l'électricité atmosphérique, du magnétisme

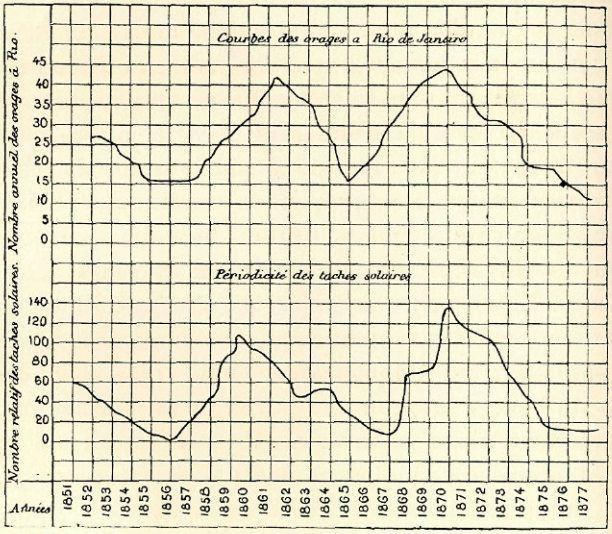

Fig. 25.

terrestre et des taches solaires (v. p. 91) devaient nécessairement conduire à rechercher la relation qui pouvait aussi exister entre les perturbations de la photosphère et les troubles atmosphériques.

(1) *Phén. Elect. de l'Atm.*, G. Planté.

A Rio de Janeiro, M. Cruls a constaté que les orages étaient soumis à des variations régulières pour la période qui s'étend de 1851 à 1876 ; ces variations présentent deux maxima et deux minima et offrent de plus, une coïncidence singulière avec le nombre des taches solaires observées (1). (Fig. 25.) M. Cruls rappelle à ce sujet le rôle prépondérant que joue le Soleil par son action électro-magnétique dans un grand nombre de phénomènes terrestres et la relation évidente qui existe entre la périodicité des taches et celles de ces phénomènes. Cette coïncidence qui paraît étrange au premier abord nous semble ensuite toute naturelle quand on considère l'influence que doivent avoir ici les cratères solaires dont le diamètre est souvent double et triple de celui de la terre toute entière.

Les travaux de M. Tacchini à l'observatoire du Collège romain concluent à un maximum exceptionnel de taches solaires pendant le mois de juillet, mois de la fréquence des orages sur la plupart des continents terrestres (2).

Les nombreux et violents orages de 1890 semblent se relier directement aux troubles solaires observés. En effet, il résulte des observations de M. Zenger que l'extension à trois continents des perturbations du mois d'août tend à faire exclure les causes terrestres et locales et que, d'autre part, l'influence périodique du Soleil est manifeste ainsi que l'influence des essaims d'étoiles filantes.

Un intervalle de douze à treize jours, égal à la période solaire, a séparé les trois grandes perturbations atmosphériques. De même le maximum des passages des Perséides

(1) *Comptes rendus de l'Acad. des Sciences* pour 1881, T. II., p. 642.

(2) *Comptes rendus de l'Acad. des Sciences* pour 1881, T. II, p. 948.

a coïncidé avec des tempêtes et des orages en Europe et une éruption volcanique en Amérique. « On peut penser, dit M. Zenger, que, à l'occasion des recrudescences de l'activité solaire et du passage des grandes masses de nuages cosmiques, les hautes couches de l'atmosphère ont été chargées d'électricité à potentiel élevé, et que c'est alors que se sont produites des décharges puissantes et prolongées qui ont déterminé des mouvements tourbillonnaires et des condensations rapides de vapeurs d'eau. De là, des cyclones, des trombes, des orages et, par l'aspiration des gaz souterrains, des émanations de grisou dans les houillères et des éruptions volcaniques souvent accompagnées de tremblements de terre » (1).

M. l'abbé Fortin, qui se livre à d'incessantes observations sur les troubles solaires, croit pouvoir annoncer à coup sûr, à l'aide des déviations de son magnétomètre, l'approche des orages. Il avait en effet prédit les perturbations du mois d'août 1890 (2).

VIII. Eclairs

Lorsque le trait de feu sillonne l'espace qui sépare deux centres électriques, ce n'est pas le hasard qui le guide dans sa marche rapide; sa route est tracée d'avance, il jaillit entre les deux points les plus rapprochés, là où une traînée humide, par une plus grande conductibilité, vient remplacer le fil qui, dans le circuit d'une pile, dirige le courant:

(1) *Comptes rendus de l'Acad. des sciences* pour 1890, (Séance du 15 septembre).

(2) *Comptes rendus de l'Acad. des Sciences* pour 1890, T. II, (Séance du 28 juillet) et *Le Magnétisme atmosphérique*, A. Fortin.

une rapide condensation se produit le long de ce conducteur imparfait, le vide se fait, la lumière apparaît. Une certaine résistance se trouve par conséquent encore interposée, car si la conductibilité était complète il n'y aurait pas de décharge et pas de manifestation lumineuse.

Franklin s'exprime ainsi à ce sujet :

« Je suis d'avis, dit-il, que dans chaque coup de foudre, le flux électrique qui se meut pour rétablir l'équilibre entre la terre et le nuage trace toujours d'abord son passage et décide, si je puis m'exprimer ainsi, sa propre trace, prenant sur son chemin tous les conducteurs qu'il peut rencontrer, tels que les métaux, le bois humide.....; qu'il déviera considérablement d'une course directe par l'effet des bons conducteurs et qu'il se meut quoique silencieusement et d'une manière imperceptible dans cette trace avant l'explosion (1). »

Dans les conclusions de l'instruction de 1867 sur les paratonnerres on lit aussi : « Il importe de bien remarquer que jamais la foudre ne s'élance sans savoir où elle va, jamais elle ne frappe au hasard : son point de départ et son point d'arrivée, qu'ils soient simples ou multiples se trouvent marqués d'abord par un rapport de tension électrique et au moment de l'explosion le sillon de feu qui les unit, allant à la fois de l'un à l'autre, commence en même temps par ses deux extrémités. »

La foudre ne suit donc pas toujours le chemin direct, la ligne droite, mais plutôt la route qui est électriquement la plus courte, c'est-à-dire qu'elle dévie le plus généralement si un corps isolant se trouve sur son passage, pour reprendre ensuite sa direction dans le milieu conducteur qu'elle

(1) *Œuvres*, B. Franklin, T. I, p. 311.

n'aura que momentanément abandonné. Si la conductibilité des deux milieux ainsi séparés par un obstacle est suffisamment grande, le courant continue sa course et traverse l'obstacle quel qu'il soit.

De plus, la densité des centres nuageux, la composition plus ou moins conductrice des milieux traversés, leur éloignement, viennent modifier la forme de l'éclair et peuvent dans certains cas avoir quelque influence sur sa couleur. Rappelons-nous que l'étincelle est :

blanchâtre dans l'oxygène,
d'un bleu verdâtre dans l'acide carbonique,
bleue teintée de pourpre dans l'azote,
rouge violacé dans l'hydrogène,
et rougeâtre dans l'air raréfié,

nous comprenons aussitôt les teintes différentes que présente l'éclair dont la lueur passe du blanc bleuâtre au rouge violacé suivant que la foudre éclate entre le sol et le nuage, ce qui mélange au spectre blanchâtre de l'oxygène la raie verte du carbone, ou bien entre des amas nuageux à densité considérable et dont l'étincelle doit évidemment présenter la raie rouge de l'hydrogène, à laquelle il faut ajouter l'influence des poussières ferrugineuses qui viennent renforcer les particules rougeâtres de l'éclair.

En effet, d'après Arago, les éclairs qui apparaissent dans les nuages sont pourprés ou violacés (1). M. Renou a été témoin deux fois d'éclairs pourpres le 20 juin 1857 à Paris et le 16 juillet 1865 à Vendôme, mais il croit devoir attribuer pour cause à cette couleur un air très raréfié (2).

Ici se présente une question qui ne nous semble pas

(1) *Annuaire du Bureau des Longitudes*, 1838, p. 249.
(2) *Comptes rendus de l'Acad. des Sciences* pour 1876, T. II, p. 1002.

encore complètement résolue. L'éclair est-il instantané ? Il nous paraît évidemment avoir une durée appréciable; mais on ne peut s'en rapporter à la simple vision, car il est certain que l'œil conserve un instant l'impression de l'éblouissante lumière qui l'a frappé.

On connaît l'expérience de Wheatstone à ce sujet : il faisait tourner, dans l'obscurité, une roue à rayons d'argent mat; lorsqu'un éclair venait à briller, on ne voyait jamais que l'un des rayons de cette roue, quelle que fût la rapidité de la rotation. Wheatstone en conclut que l'éclair ne dure pas même un millième de seconde.

D'autre part, M. Trouvelot, ayant fait des essais de photographie d'éclairs, eut l'idée d'imprimer un léger mouvement horizontal de va-et-vient à l'appareil pendant la pose; il obtint une image qui avait de larges stries horizontales et parallèles avec le sens du mouvement. L'éclair avait donc l'aspect d'une légère banderolle ondulant sous la brise.

« Ces résultats, dit M. Trouvelot, indiquent suffisamment que l'éclair a une durée appréciable, sinon dans tous les cas, du moins dans quelques-uns et par conséquent que les expériences de Wheatstone sont entachées d'erreur » (1).

M. Colladon avait déjà fait en 1879 et 1886 des expériences analogues qui lui avaient démontré la non instantanéité des éclairs.

Quant aux différentes formes que peuvent affecter les éclairs, elles nous sont toutes reproduites par les machines électriques et par la machine rhéostatique de Planté.

Leurs formes nous sont même expliquées par la description des diverses étincelles des machines :

(1) *Comptes rendus de l'Acad. des Sciences pour 1889*, T. I (Séance du 17 juin).

« Quand on place, dit M. Michaut, à quelques centimètres d'une machine électrique un corps conducteur en relation avec le sol, on obtient une série d'étincelles blanches rectilignes... En éloignant le corps conducteur, l'étincelle prend une forme sinueuse présentant des ramifications divergentes (fig. 26). En augmentant encore la distance, les

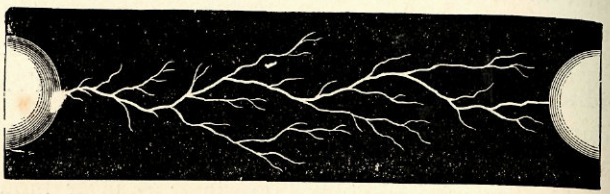

Fig. 26.

étincelles deviennent plus rares et plus fortes, le sillon lumineux qu'elles tracent a la forme d'un zigzag » (1) (fig. 27). Arago avait divisé les éclairs en trois catégories : les éclairs linéaires, simples ou ramifiés, les éclairs diffus et les éclairs en boule; ces distinctions ne sont pas adoptées par tout le

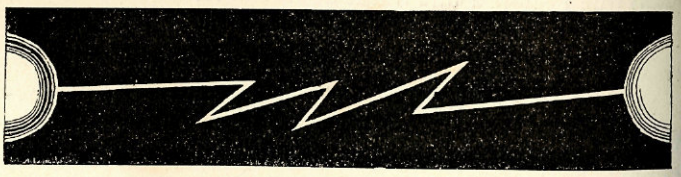

Fig. 27.

monde, elles peuvent au gré de chacun se subdiviser ou se réunir. Nous allons étudier leurs différents aspects et décrire quelques-unes de leurs particularités pour voir ensuite la classification à laquelle nous devrons nous arrêter.

(1) *L'Électricité, notions et applications usuelles*, Aug. Michaut, p. 56.

1° Eclairs rectilignes. — La foudre peut être rectiligne (Fig. 28); ce trait rigide qui relie la source électrique à l'induit n'apparaît que si ces deux points sont très rapprochés, ce qui ne peut guère se produire qu'entre les nuages lorsque l'étroit milieu interposé possède une constitution homogène.

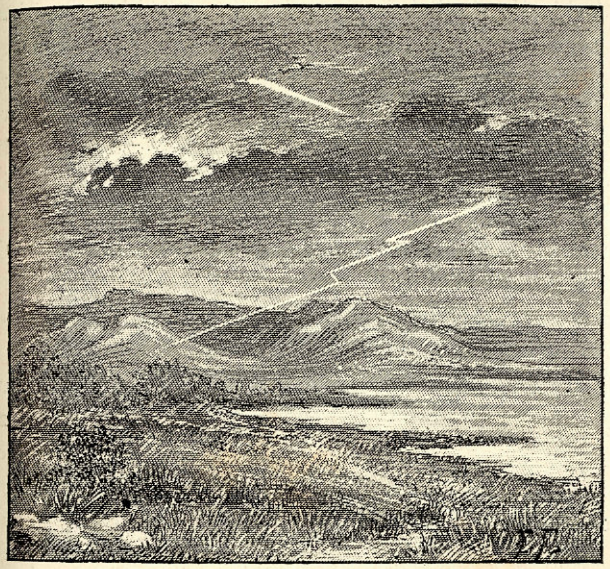

Fig. 28.

2° Eclairs sinueux. — Si la distance qui sépare la source inductrice de l'induit augmente, si la foudre *tombe* sur le sol, selon l'expression populaire, elle apparaîtra sous la forme de longues sinuosités ou de traits en zigzag (Fig. 21 et 28).

« Les deux électricités, dit Becquerel, pour reformer le

fluide neutre, prennent toutes les directions qui leur donnent un facile passage. Dès l'instant qu'elles trouvent une route facile, elles la suivent ; c'est ainsi qu'elles abandonnent de l'air condensé qui leur présente de la résistance pour entrer dans de l'air qui ne l'est pas ; de là ces lignes brisées, ces zigzags qui constituent la marche des éclairs. » (1)

On s'est souvent demandé si ces sinuosités étaient composées de lignes brisées à angles aigus ou bien de spirales soit régulières, soit irrégulières. Beaucoup d'observateurs penchent pour cette deuxième proposition, disant qu'il faut tenir compte de la perspective, car elle peut nous faire voir des angles aigus là où, en réalité, il n'y a que des courbes. M. de Fonvielle fut témoin en 1868 d'un éclair en hélice ; il avait déjà reconnu des traces héliçoïdales sur le réservoir de Montmartre frappé par la foudre le 8 avril 1866 : la tôle portait des spires nettement marquées ; il observa ensuite ce même phénomène sur des troncs d'arbres et cite même le cas où deux arbres étant peu éloignés, la foudre avait passé de l'un à l'autre et le second portait la suite exacte de l'empreinte commencée sur le premier (Fig. 29). « Est-ce l'action du coup de foudre qui lui a donné cette direction ? est-ce au contraire la direction persistante des fibres qui a tracé la route de l'électricité » (1). Cette dernière pensée, il le raconte lui-même, lui fut suggérée par la remarque de gardes forestiers sur la constitution du bois de certains arbres dans les pays de montagnes : l'action continue du vent tordait leurs fibres presque régulièrement. Mais non, ajoute ce même auteur, « la tendance à la spirale est naturelle au fluide » et il voit plutôt dans cette forme l'influence du magnétisme terrestre.

(1) *Traité d'électricité*, Becquerel, T. I, p. 159.

Les exemples de foudre en hélice sont nombreux.

Les foudroyés portent souvent des sillons qui partent du cou et s'enroulent sur leur corps jusqu'aux jambes. Coulvier-Grandier fait mention d'un éclair spiroïde qu'il vit descendre sur le paratonnerre du pavillon de l'Horloge du

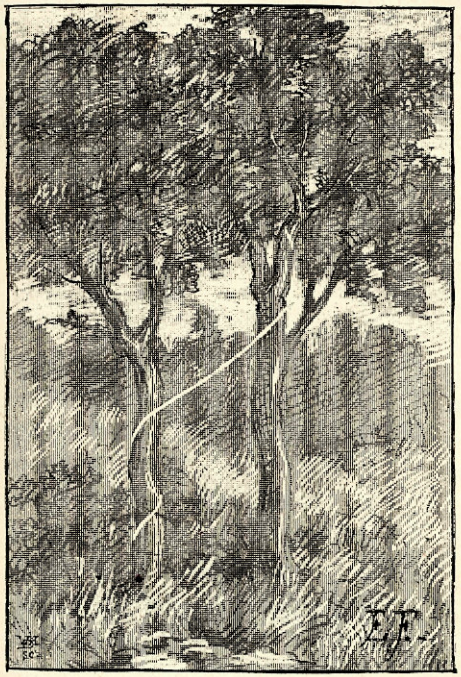

Fig. 29.

Luxembourg le 26 juin 1850. (2) Pendant l'orage du 6 août 1880, M. Rouyer constate sur des peupliers des traces

(1) *Eclairs et Tonnerres*, W. de Fonvielle, p. 87.
(2) *Recherches sur les météores*, Coulvier-Grandier, p. 183, 1859.

héliçoïdales. (1) En octobre 1882, la foudre frappe une des lignes télégraphiques du Havre, suit le fil métallique et 40 poteaux portent des rainures régulières en hélice, etc...

La photographie est venue aider à l'examen de cette question. M. Moussette qui a pu saisir l'ensemble du phénomène affirme que « les étincelles éclatant de nuage à terre et constituant ce que l'on appelle la foudre, ont la forme de spires irrégulières » puis il ajoute : « l'écartement des spires est variable durant le trajet ; tantôt il dépasse plusieurs diamètres, tantôt il paraît moindre qu'un diamètre... cette irrégularité est due à l'invariabilité de résistance des couches aériennes traversées, suivant leur température et leur degré d'humidité... En somme l'aspect de ces éclairs rappelle celui que présentent, de nuit, des pièces d'artifice dont le mouvement de translation est accompagné d'un mouvement gyratoire. » (2)

Planté a observé un double exemple d'éclair en hélice sur des arbres de la forêt de Satory, le 14 juillet 1880. Il rattache, d'accord avec M. de Fonvielle, cette tendance d'un flux considérable d'électricité à s'écouler en spirale au grand mouvement magnétique terrestre qui détermine dans l'atmosphère des phénomènes électro-dynamiques semblables au mouvement gyratoire des trombes et par extension à celui des cyclones et des tourbillons électrisés dans les orages à grêle. (3)

Il avait remarqué que le sens du mouvement gyratoire d'électrodes liquides ou de flux de matières solides entraînées par un courant d'électricité positive au dessus du pôle boréal d'un aimant était précisément le même que celui des

(1) *Comptes rendus de l'Acad. des Sciences* pour 1880, T. II, p. 503.
(2) *Comptes rendus de l'Acad. des Sciences* pour 1886, T. II, p. 31.
(3) *Recherches sur l'électricité*, G. Planté, p. 223.

tourbillons de l'atmosphère dans l'hémisphère boréal (fig. 15).

« Nous avons conclu, dit-il, que les courants électriques de l'atmosphère étant mobiles dans tous les sens autour des points d'où ils émanent, le magnétisme du globe devait nécessairement convertir leur mouvement rayonnant et rectiligne en un mouvement gyratoire de forme spirale. Si l'écoulement du flux électrique que nous admettons toujours positif vient à se produire entre un nuage électrisé et un point donné du sol sous la forme d'un éclair, le sillon lumineux devra tendre à décrire une hélice, et une hélice de sens déterminé qui sera dextrorsum dans l'hémisphère boréal, sinistrorsum dans l'hémisphère austral » (1) et il cite l'expérience de M. Le Roux dans laquelle

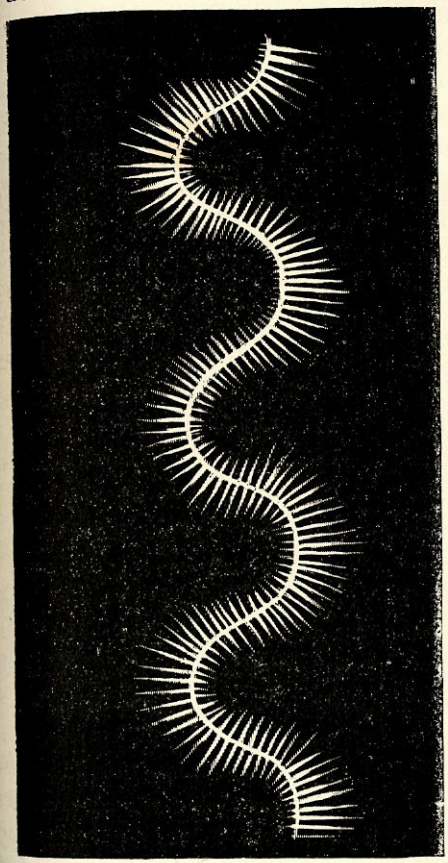

Fig. 30.

(1) *La Nature*, 1877, T. I, p. 301.

un fil métallique très fin, traversé et rougi par un courant électrique, s'enroule spontanément en hélice avec une très grande rapidité autour d'un aimant. Avec un flux descendant d'électricité positive le sens de l'hélice formée est dextrorsum au dessus d'un pôle boréal et sinistrorsum au dessus d'un pôle austral. D'ailleurs, l'étincelle des machines prend souvent la forme sinueuse d'un hélice (Fig. 30).

En résumé les traits de feu en zigzag qui constituent

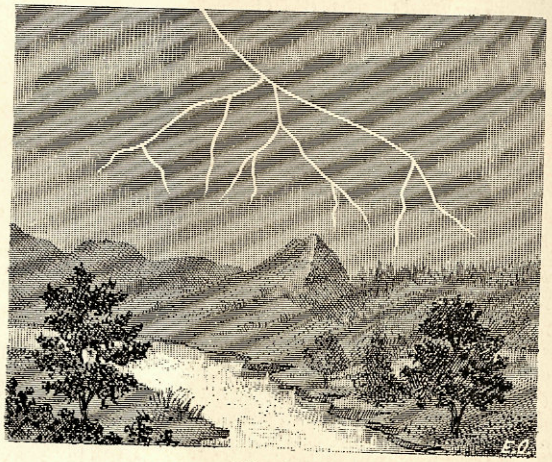

Fig. 31.

la foudre sont le plus souvent des sinuosités à spires tantôt régulières tantôt irrégulières suivant la rapidité d'écoulement du fluide électrique et les différences de conductibilité. Le trait lumineux nous paraît brisé parce qu'il est souvent interrompu en un point dont la conductibilité est parfaite pour reparaître dans une nouvelle direction lorsque revient la résistance et nous ne voyons pas alors la courbe ininterrompue que suit toujours le courant.

3° Eclairs ramifiés. Les éclairs linéaires peuvent être,

nous dit Arago, simples, bifurqués, trifurqués ou ramifiés en nombre assez grand (fig. 31). Lorsque le flux électrique est rapide, abondant et que certains points lui présentent une égale résistance, le chemin qu'il s'est ouvert est pour ainsi dire trop étroit pour lui; il se divise, se multiplie et s'élance par cent voies différentes. Cette division en

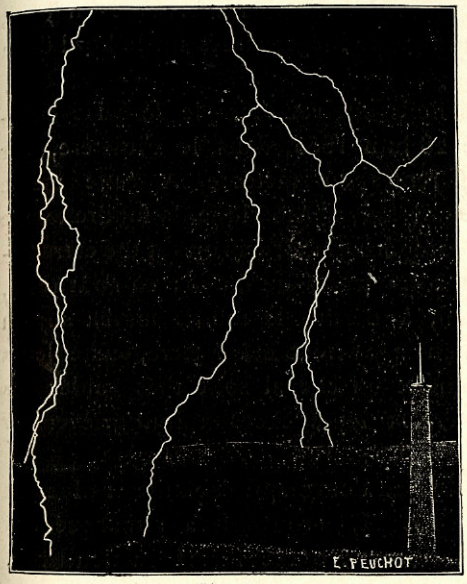

Fig. 32.

rameaux est plus fréquente qu'on ne le croit généralement. Tel éclair qui semble être simple à la vue apparaît sur la plaque sensible d'un appareil photographique comme un arbrisseau avec ses rameaux ou comme le tracé géographique d'un fleuve accompagné de ses affluents. M. Robert Haensel, en 1883, a photographié des éclairs à Reichemberg en Bohême (fig. 32) et non seulement il a pu déterminer les nombreuses ramifications de l'éclair et relever avec une grande exactitude les points foudroyés, mais encore calculer approximativement la longueur de la traînée lumineuse qu'il a évaluée à 1700 mètres environ. M. Trouvelot a compté sur la photographie d'un éclair 37 ramifications (1).

(1) *Comptes rendus de l'Acad. des Sciences,* pour 1888, T. II, p. 147

Soit directement, soit par leurs effets, on connaît depuis longtemps les éclairs ramifiés. Joule de Manchester les comparait à un arbre lumineux. Nous lisons même dans les mémoires de l'Académie des sciences : « le 7 juillet 1700, les habitants de la Hague en Basse-Normandie virent dans l'air un feu qui avait la figure d'un arbre et parut tomber et se perdre dans la mer avec un bruit qui fit trembler deux gros villages situés sur le bord de la mer » (1).

M. de Fonvielle nous cite cet exemple de seize cultivateurs frappés, le 28 juin 1865, dans le Finistère, par seize branches différentes du météore. A cette même époque, dans le Tennessee en Amérique, la foudre tombe sur les hommes de garde à Zullahorma : un est tué et trente-deux portent sur eux les traces du fluide ; en août 1889, dans le Thiergarten, à Berlin, la foudre tomba sur un peloton de cinq uhlans qui furent jetés à terre, eux et leurs montures. Un homme et un cheval sont tués raide ; les quatre autres cavaliers et leurs chevaux sont grièvement atteints (2).

Le 8 mai 1890, pendant l'orage qui s'abattit sur Meudon vers 6 h. 30 m. du soir, M. Trouvelot a remarqué des éclairs ramifiés, arborescents, d'une forme particulière : « L'apparition fut simultanée, deux points éloignés de la nuée s'allumèrent au même instant et deux masses éblouissantes de lumière se précipitèrent l'une vers l'autre en se divisant en nombreuses branches qui, elles-mêmes, se subdivisaient en branches plus petites. La rencontre qui semblait inévitable n'eut pas lieu cependant... Ces éclairs, qui venaient de se développer avec assez de lenteur pour permettre de bien en saisir les formes, furent pour moi une révélation. Ce n'était plus deux éclairs que j'avais sous les yeux, mais deux étincelles électriques, absolument semblables, sauf la grandeur, aux étincelles des machines d'induction... Dans ces formes arborescentes, je reconnus avec certitude que celle qui était au nord sous le vent, et dont les branches étaient sinueuses et ondulées, avait le type caractéristique des décharges du pôle positif des machines d'induction ; tandis que celle qui était au sud, du côté du vent et dont les branches zigzaguées subissaient de brusques déviations à angle droit, avait le type des décharges du pôle négatif » (1). M. Trécul avait fait en 1880 des observations analogues.

(1) *Mémoires de l'Académie des Sciences*, 1700, p. 10.
(2) *Chronique météorologique, La Nature*, 1889.

Enfin, Planté nous rappelle les images d'arbres et de rameaux imprimés, et que l'on croyait photographiés, sur le corps d'un foudroyé : ce n'était « que le résultat des ramifications du trait de la foudre elle-même » (2).

4° Eclairs diffus. — Eclairs sans tonnerre. Les éclairs diffus, dont Arago fait une classe à part, éclatent dans les nuages et embrasent un large espace au lieu de produire un trait lumineux. Certains auteurs ont cru devoir les faire rentrer dans la catégorie des éclairs linéaires, supposant qu'un premier rideau de nuages cachait aux yeux de l'observateur le sillon fulgurant. D'autres, Fournet, par exemple, ont au contraire établi des subdivisions d'éclairs diffus. Il nous semble possible que des éclairs rectilignes ou sinueux, éclatant dans l'intérieur de l'amas nuageux nous apparaissent comme une lueur réfléchie par l'ensemble de ce nuage, mais il doit se produire aussi un

(1) *Comptes rendus de l'Acad. des Sciences pour 1890*, T. II, p. 308.
(2) *Recherches sur l'électricité*, G. Planté, p. 270.

phénomène lumineux qui, à notre avis, est une sorte de diffusion électrique que l'on a improprement appelé *éclair* diffus ou désigné quelquefois sous le nom d'éclair sans tonnerre. En effet, on a vu souvent pendant un orage des lueurs rougeâtres ou violacées illuminer la nue sans être suivies d'aucune détonation. Les anciens en font mention, et Lucrèce dit que, « d'innocents éclairs s'échappent en silence de certains nuages et qu'ils ne causent ni trouble ni terreur » (1). On en observe bien souvent dans les orages violents qui éclatent si fréquemment aux Antilles, et M. d'Abbadie qui en a aussi remarqué en Ethiopie, nous dit à ce sujet : « C'était le 1er décembre 1845, vers 8 heures du matin, je descendais lentement une colline qui domine de 100 *m.* environ le vallon voisin couvert d'un brouillard presque diaphane. Au dessus, à une distance de presque 3 *kilom.*, on voyait clairement la sommité boisée. J'étais tout près de ce brouillard, certainement pas à plus de 2 *kilom.* de son extrémité opposée, lorsque tout à coup son centre s'illumina par un éclair sous forme de nappe diffuse sur ses bords et n'embrassant pas toute l'étendue du brouillard... Je demandai à l'indigène qui m'accompagnait, s'il avait aperçu quelque chose. Il me répondit que c'était un éclair dans le corps du brouillard, et pas plus que moi il n'entendit aucun tonnerre » (2).

G. Planté explique ce phénomène par son expérience des gaz raréfiés que nous avons citée plus haut (3). « Si, par suite de l'humidité plus grande de quelques-unes des pointes des peignes de papier, celles ci viennent à se trouver en contact plus prolongé, et si la vaporisation dure

(1) *De naturâ rerum*, lib., 6.
(2) *Comptes rendus de l'Acad. des Sciences* pour 1881, T. I, p. 832.
(3) Voir p. 127.

plus longtemps, la lueur dans le tube à air raréfié, au lieu de n'apparaître que pendant une seconde ou une fraction de seconde, persiste pendant plusieurs secondes ou minutes et on s'explique ainsi l'émission continue de lumière sans tonnerre et sans décharges bruyantes que l'on observe quelquefois dans certains nuages, ou dans des portions de nuages orageux » (1).

Nous voyons donc par cela même qu'il faut faire rentrer ces lueurs diffuses dans les diverses manifestations lumineuses que l'on observe pendant les orages, dont nous parlerons plus loin et qui en réalité ne sont pas des éclairs ; c'est pourquoi nous sommes de l'avis de M. Palmieri, quand il dit que « la décharge de la foudre comporte nécessairement avec elle la lumière de l'éclair et le bruit du tonnerre et qu'il est impossible d'avoir des éclairs sans tonnerre. » M. Plumaudon dit également : « il doit y avoir des éclairs diffus qui s'opèrent par une espèce de diffusion électrique lorsque la conductibilité du nuage devient suffisante pour qu'une infinité de petites décharges puissent s'effectuer simultanément dans une vaste région, ce qui produit un éclairement sans tonnerre. Les éclairs sinueux sont toujours explosifs » (2). De même l'opinion de M. Jarriant est identique (3).

Nous pouvons encore conclure de tout ce qui précède, que les éclairs dits *éclairs de chaleur*, qui sillonnent l'horizon certains soirs de grande chaleur, sont le résultat de décharges éloignées dont le son ne peut nous arriver. M. d'Abbadie semble peu partisan de cette théorie, et il indique une manière simple d'en faire la preuve : Il est

(1) *Phénomènes Elect. de l'Atm.*, G. Planté, p. 167.
(2) *La Nature*, 1884, T. II, p. 173.
(3) *Etude sur les paratonnerres*, Jarriant, p. 20, 1884.

évident, dit-il, que si de Toulouse on notait des éclairs de chaleur sur l'azimut de Hendaye et si au même instant on voyait de ce dernier lieu des éclairs silencieux dans la direction de Toulouse, tandis que des observations intermédiaires constateront l'absence de tout orage, il faudrait abandonner l'explication vulgaire des éclairs de chaleur ». (1)

Les lignes suivantes de M. Palmieri semblent répondre à cette proposition de M. d'Abbadie : « Les éclairs du soir, dits éclairs de chaleur, ne sont autre chose que la manifestation d'orages lointains, comme j'ai eu l'occasion de m'en assurer après avoir demandé par le télégraphe des nouvelles du temps ; le plus grand intervalle qu'il m'ait été donné de constater entre l'apparition de l'éclair et l'audition du tonnerre, a été de 59 secondes. Par conséquent, le bruit du tonnerre ne dépasse pas 21 *kilom.* tandis que la lumière peut être aperçue à des distances beaucoup plus considérables ». (2) M. Renou précise : « Dans l'immense majorité des cas, les éclairs de chaleur ne sont que le reflet d'orages très éloignés, jusqu'à 200 et 300 *kilom.* ; quelques personnes se refusent à admettre qu'on puisse percevoir la lueur des orages à une si grande distance ; le fait me paraît pourtant hors de doute ». (3) Enfin il assigne au bruit du tonnerre une portée de 24 *kilom.* qui peut aller, ainsi qu'il l'a observé en 1875 aux Ponts-de-Braye, à 40 *kilom.* Ce fait est sans doute rare et tout dépend d'ailleurs, pour les éclairs, de la disposition des nuages qui reflètent les lueurs et, pour le tonnerre, de la conductibilité sonore des terrains. Nous avons vu au

(1) *Comptes rendus de l'Acad. des Sciences* pour 1881, T. I, p. 832.
(2) *Lois et origines de l'élect. atm.*, L. Palmieri, p. 42.
(3) *Comptes rendus de l'Acad. des Sciences* pour 1876, T. II, p. 1002.

Ratero, près de Perpignan, à l'horizon d'un ciel pur, de nombreux éclairs qui n'étaient que les décharges de la foudre éclatant sur Narbonne ; le fait fut contrôlé : l'orage s'approcha et le tonnerre commença à se faire entendre lorsque les nuages apparurent au-dessus de l'horizon. La distance du Ratero à Narbonne est de 40 *kilom.*

De même, d'autres éclairs remarqués en temps serein, que leur rareté faisait regarder par les anciens comme un prodige, peuvent provenir de décharges très lointaines dont la lumière se trouve réfléchie sur des nuées transparentes, ce qui nous fait croire à une absence totale de nuages. Gassendi assure que ce prétendu prodige ne peut arriver que dans les localités où l'horizon est trop borné pour qu'on puisse apercevoir la nuée d'où part la foudre ; Muschenbroek est du même avis. Ce peut être encore, dans les espaces raréfiés du zénith, une illumination induite par des décharges éloignées, car M. Le Roux produisait des lueurs dans un ballon à air raréfié placé auprès des conducteurs d'une machine électrique dont on tirait des étincelles (1).

On aura ainsi l'explication du phénomène observé par M. Rousseau dans la nuit du 20 au 21 juillet 1882 : « Le ciel était totalement pur, sans un seul nuage. Bientôt je remarquai que des nappes lumineuses semblables à des éclairs diffus remplissaient par instants la surface du ciel ; tandis que je contemplais ce spectacle, je vis avec étonnement que des éclairs diffus de même nature se produisaient à 6 ou 7 mètres de la terre » (2).

Il se produisait évidemment, dans ce cas, un second effet d'induction à la surface du sol.

(1) *Comptes rendus de l'Acad. des Sciences* pour 1869, T. I, p. 1104.
(2) *Comptes rendus de l'Acad. des Sciences* pour 1882, T. II, p. 262.

Nous nous trouvons donc amenés à ne reconnaître jusqu'ici que trois classes d'éclairs :

Les éclairs rectilignes.

Les éclairs sinueux ou en spirale.

Les éclairs ramifiés.

Et nous ajouterons :

La foudre globulaire.

L'éclair en chapelet.

Ce qui complètera la nomenclature.

5° Foudre globulaire. — La théorie de la foudre globulaire est toute moderne. Arago lui-même n'en parle que vaguement, il voyait dans ce phénomène un transport de matières pondérables fortement chargées d'électricité, mais il ne donne aucune explication détaillée. Becquerel croit à une sorte de réaction chimique, mais il n'ose formuler sa théorie que sous la forme interrogative. « La foudre, dit-il, en traversant l'atmosphère, réagit sur les principes constituants de l'air, d'où résulte de l'acide nitrique ; ne serait-il pas possible aussi que la foudre déterminât la combinaison des matières de toute nature qui peuvent exister dans l'air ? » (1).

De même, Besnou, ancien pharmacien de la marine, trouve par l'analyse que l'eau d'orage est riche en iode et en sels ammoniacaux. Etant donné la promptitude avec laquelle l'ammoniaque peut réagir sur l'iode dissous ou simplement divisé, et former l'iodure d'azote, corps intactile par excellence, « ne serait-il pas possible, dit-il, d'admettre qu'il puisse se former dans les nuages une réaction analogue, une combinaison iodurée de l'ammoniaque,

(1) *Traité d'électricité*, Becquerel, T. VI, p. 153.

existant sans doute dans ces régions élevées, avec l'iode en vapeur et de l'eau vésiculaire ? » (1).

La question, reprise par du Moncel, n'a été élucidée que par Planté à la suite de ses expériences et il a pu expliquer les différents phénomènes et les particularités que présente la foudre globulaire.

Avant d'analyser les recherches de ces deux savants, citons quelques exemples de foudre globulaire, afin de pouvoir signaler ses principaux caractères.

On trouve dans tous les ouvrages de fréquentes observations de ce phénomène.

Au Quesnoy, le 4 juillet 1717, on vit une boule de feu, sortie d'un nuage, se briser sur la tour de l'église avec une forte détonation et se répandre sur la place comme une pluie de feu (2).

Le 3 juillet 1725, dans le Northamptonshire, le révérend John Wasse vit pendant un orage un globe de feu ayant l'apparence de la lune, passer en sifflant au-dessus de son jardin (3).

On sait que Richmann fut tué à Saint-Pétersbourg, le 6 août 1753, par un globe de feu qui s'élança de la barre de fer d'où le physicien tirait des étincelles et qui vint le frapper au front en faisant explosion.

Arago cite un tonnerre en boule observé par Batti, peintre de l'impératrice d'Autriche, à Milan, en 1841. Il vit un globe de feu d'un jaune rougeâtre qui se mouvait au niveau de sa fenêtre, au milieu de la rue, dans une

(1) *De la formation de l'iodure d'azote dans les orages*, Besnou. (*Mémoires de la Société des Sciences naturelles de Cherbourg*, T I, p. 103, 1853).

(2) *Mémoires de l'Académie des Sciences*, 1717, p. 8.

(3) *Notice sur le tonnerre*, Arago, p. 259.

direction oblique. Après trois minutes de marche ascendante, ce globe alla heurter la croix du clocher de l'église *dei Servi* et disparut avec un bruit sourd. Malgré la lumière qui l'entourait et qui empêchait de distinguer bien nettement ses contours, on pouvait en comparer le diamètre à celui de la lune à son lever.

M. de l'Epée, président du conseil d'administration du chemin de fer de Rouen, écrivait à M. Pouillet les lignes

Fig. 33.

suivantes, au sujet d'un orage qui éclata sur la station de Beuzeville le 17 mai 1852, à 5 heures du soir : « Trois coups de tonnerre se succèdent à peu d'intervalle; au troisième, la foudre tomba derrière une ferme à 1 *kilom.* de la station. Des arbres marquèrent le point où la brillante et forte décharge atteignit le sol, mais au même moment on vit jaillir de derrière les arbres un globe de feu de la grosseur d'un petit obus, d'une couleur d'un

rouge brun, décrivant une trajectoire allongée, laissant derrière lui une vive lumière, marchant avec une vitesse modérée, que l'œil suivait facilement... (Fig. 33.) On se le montrait avec admiration, quand on le vit se poser comme un oiseau sur les fils électriques, à une centaine de mètres de la station. A ce moment, il disparut et toute lumière avec lui et cela avec la rapidité de la pensée (1) ».

Mme Espère vit, le 16 juin 1846, un globe de feu descendre sur un des arbres du terrain de Beaujon, puis une détonation retentit et le globe se divisa en une dizaine de rayons en zigzag qui allèrent frapper le mur d'une maison et dont l'un fit un trou comme un boulet de canon (2).

Pendant un orage, en 1878, on vit à Toucy (Yonne), deux boules de feu de 0,30 *m.* à 0,40 *m.* de diamètre qui roulèrent avec une extrême rapidité vers le sol où elles se perdirent instantanément (3).

Dans la Manche, la foudre tomba, le 22 avril 1880, sur un bateau pêcheur, brisa le grand mât et pénétra dans l'intérieur du bâtiment. Le patron apercut un globe de feu qui le renversa sur le pont et disparut sans bruit (4).

La foudre tombe, à Amiens, en mai 1883, sur une maison voisine du Jardin des Plantes, sous la forme d'un globe bleuâtre de la grosseur d'une noix : il pénètre dans la maison, fait lentement le tour de la salle à manger, frôle la main du maître de la maison et disparaît avec une très forte détonation (5).

M. Hildebrand Hildebrandson a observé un cas de

(1) *Comptes rendus de l'Acad. des Sciences,* pour 1852, T. II, p. 400.
(2) *Comptes rendus de l'Acad. des Sciences* pour 1852, T. II, p. 192.
(3) *La Nature,* 1878, T. I, p. 200.
(4) Idem, 1880, T. I, p. 367.
(5) *Comptes rendus de l'Acad. des Sciences* pour 1883, T. I.

foudre globulaire à Upsal, en Suède : après un éclair, un globe semblable à un œuf d'or entra dans la maison et en sortit après plusieurs détonations. L'orage venait de l'ouest et la fenêtre qui donna passage à la foudre s'ouvrait aussi à l'ouest. M. Hildebrandson regarde la foudre globulaire comme formée de gaz explosifs, mais elle ne serait en tout cas, selon lui, qu'un phénomène secondaire et le produit d'une première décharge (1).

Dans une lettre de M. E. Blanc à M. Faye, sur un orage qui sévit en mai 1877 près de Cannes, nous relevons le passage suivant : « Au nord-est de Vence et à une distance approximative de 18 *kilom.*, un gros nuage noir paraissait extrêmement agité ; au-dessus de cette nuée, des boules de feu, semblables à des fusées partant du bouquet d'un feu d'artifice, paraissaient sortir d'un centre invisible, se dirigeaient en tous sens et après un parcours de 6 à 10 degrés éclataient silencieusement » (2).

On peut encore considérer comme un éclair globulaire le phénomène observé par M. Trécul le 25 août 1880. Il avait d'abord aperçu, pendant quelques instants seulement, une sorte de globe brillant au-dessous d'un amas nuageux, puis ce globe disparut ; il se retira pour ainsi dire dans le nuage et « abandonna une petite quantité de substance qui tomba comme un corps grave. Elle laissa derrière elle une traînée lumineuse au bord de laquelle étaient manifestes des étincelles ou plutôt des globules rougeâtres, car leur lumière n'était pas radiante » (3).

Le Dr Wartmann se rendait en voiture de Versoix à Genthod près de Genève, le 2 octobre 1888, pendant un

(1) *La Nature*, 1884, T. I, p. 302.
(2) *Comptes rendus de l'Acad. des Sciences* pour 1877, T. I. p. 666.
(3) *Comptes rendus de l'Acad. des Sciences* pour 1881, T. I, p. 775.

fort orage, lorsque tout d'un coup, sur la route, il eut l'impression d'une lueur très vive et persistante derrière lui. « Croyant à un incendie, dit-il, je tournai la tête et vis à environ 300 *m.* un globe de feu pouvant avoir 0,040 *m.* de diamètre qui cheminait dans notre direction à une vingtaine de mètres au dessus du sol avec la rapidité d'un oiseau de proie et sans laisser de trace lumineuse derrière lui. Au moment où cette boule nous dépassait, à une distance de 80 *m.* à notre droite, elle éclata avec une détonation formidable, et il me sembla qu'il s'en échappait plusieurs traits de feu. Nous ressentîmes une violente secousse et nous restâmes complètement aveuglés pendant plusieurs secondes » (1).

Le 2 janvier 1890 à Poulevedra (Espagne), M. Caballero, directeur de la station d'électricité, signale à l'Académie des Sciences de Madrid une observation de foudre globulaire par un temps calme et serein ; à 9 h. 15 m. du soir on vit apparaître tout à coup un globe de feu de la dimension d'une orange qui tomba sur l'usine d'électricité et détruisit l'appareil de distribution puis frappa la dynamo en mouvement ; il rebondit deux fois de la dynamo aux conducteurs et inversement puis éclata avec bruit sans produire d'accident (2).

Sur le passage du tornado qui a dévasté Saint-Claude le 19 août 1890, les cas de foudre globulaire ont été très nombreux. D'après M. Cadenat, professeur de physique, les récits et les témoignages concordant tous, ne laissent à ce sujet aucun doute : « Un paysan de Viry, rentrant chez

(1) *Société de Phys. de Genève et Rev. Intern. de l'élect. 1888*, T. VIII, p. 199.
(2) *La Nature, 1890*, T. I, p. 67, *Ciel et Terre et Cosmos*, janvier 1890.

lui avec son bétail et surpris par l'ouragan, voit une boule de feu qui descend rapidement; saisi de frayeur, il se jette aussitôt par terre ; le globe lumineux frappe le sol, éclate avec fracas et le couvre de poussière. C'est le seul cas d'explosion observé » (1). D'autres habitants des villages voisins ont vu des boules de feu d'un rouge vif se mouvoir lentement puis disparaître sans bruit. Ici elles ont mis le feu à un grenier ; là, elles ont pénétré dans les maisons par les cheminées, par les tuyaux de ventilation, par les corridors, tantôt rebondissant sur le sol, tantôt s'avançant en courbe de forme spiroïde, tantôt enfin passant avec rapidité, isolées ou multiples.

M. Cunisset-Carnot rapporte un fait curieux qui s'est passé pendant l'orage qui éclata le 13 août 1890 sur Dijon. La foudre frappa d'abord un poteau télégraphique placé sur la route à quelque distance des maisons, puis suivant le fil aérien sans le fondre, pénétra dans une maison où elle fit un trou au plafond et démolit une cheminée. Ensuite, après avoir encore suivi sur un certain parcours le télégraphe, elle le rompit et tomba au bord de la route sur une énorme pierre de taille qui fut mise en morceaux tandis qu'une porte voisine de jardin était arrachée de ses gonds brisés. Mais une partie de la décharge seulement avait pris cette voie, car simultanément une maison placée sur le trajet du télégraphe qui y est attachée recevait la visite du fluide dans de singulières conditions. Cette maison était celle d'un boulanger qui, au moment de la décharge, était derrière son comptoir occupé à couper du pain tandis que deux peintres montés sur un échafaudage à l'extérieur peignaient en vert la devanture de la boulangerie. Un des

(1) *Comptes rendus de l'Acad. des Sciences pour 1890*, T. II, (Séance du 6 octobre).

deux peintres fut non pas jeté à bas, mais descendu à terre sans secousse ; le pinceau que tenait l'autre fut retourné et introduit les poils les premiers dans la manche de son veston et le pot de couleur renversé. En même temps, dans la boutique, le boulanger voyait apparaître à ses pieds une boule de feu qui disparut instantanément en lui donnant une violente secousse ; son couteau était enlevé de sa main et projeté à l'autre bout de la pièce tandis que son tablier et plusieurs doigts de sa main étaient couverts de peinture verte (1).

Les exemples abondent : Peltier, Sestier, Arago, Howard, Decharme en citent de nombreux cas, mais ceux que nous venons de donner sont suffisants pour nous permettre de poser les principes suivants :

1° Les boules de feu se meuvent, dans la plupart des cas, avec une certaine lenteur ;

2° Elles peuvent disparaître avec ou sans détonation ;

3° Elles sont le plus souvent rougeâtres et leur apparition est quelquefois accompagnée d'un bruissement ou sifflement ;

4° Enfin ces globes peuvent apparaître non seulement près du sol, mais encore dans les nuages et y donner lieu aux mêmes phénomènes (2).

(1) *Rev. Int. de l'Élect.*, T. XI, p. 203.

(2) Sans nier l'existence de la foudre globulaire, M. Mascart émet des doutes sur la réalité des nombreuses observations faites à ce sujet. Il voudrait que des hommes de science puissent s'assurer, *de visu*, de leur apparition, en apportant à cette constatation, tout le soin désirable. M. Mascart croit pouvoir expliquer ce phénomène par de simples illusions d'optiques : l'éblouissement causé par un éclair aurait imprimé sur la rétine d'un observateur, une image circulaire persistante qu'on aurait cru suivre alors qu'on la déplaçait inconsciemment en deplaçant successivement le regard, (*Comptes rendus de l'Acad. des Sciences* pour 1890, T. II, Séance du 6 octobre.)

Voici le résumé de la théorie de Du Moncel. Il fait remarquer d'abord que l'eau, considérée dans sa masse, est un bon conducteur de l'électricité, mais à l'état de division ou de couche très mince, il la classe parmi ce qu'il appelle des conducteurs secondaires qui, tout en offrant un passage facile, présentent une certaine résistance, comme les poussières, les limailles, etc. : « Versez, dit-il, une goutte d'eau sur une planche vernie et répandez-la avec le doigt de tous côtés jusqu'à ce qu'elle ne forme plus qu'une couche très mince et très divisée par le vernis ; l'étincelle s'échangera au travers comme dans le cas de la limaille métallique, seulement elle sera plus brillante, plus nette dans ses contours et changera de couleur suivant que la couche d'eau sera plus ou moins épaisse. Dans le premier cas, elle sera violette, ininterrompue et terminée le plus souvent par une *boule de feu* rouge; dans le deuxième, elle sera d'une blancheur éblouissante et quelquefois bleuâtre. » (1)

La foudre globulaire serait donc le résultat de l'électricité terrestre dégagée à un haut degré de tension par l'influence d'un nuage orageux et qui se trouverait attirée vers ce nuage par un courant ascendant d'air humide. Si l'air était complètement sec, il n'y aurait qu'une aigrette ou une lueur.

Si quelque partie de ce conducteur humide vient à présenter, par une circonstance quelconque, une longue et étroite bande isolante, alors l'électricité en mouvement dans ce conducteur se trouve à demi arrêtée, mais comme elle possède une tension considérable, elle franchit cet obstacle sans bruit, puisqu'il n'y a pas décharge, et se présente sous la forme d'un globe de feu, parce que l'étincelle

(1) *Étude sur les Éclairs*, Du Moncel, 1857, p. 35.

électrique immobile a la forme d'une sphère lumineuse, « comme on peut s'en convaincre, dit-il, en provoquant une étincelle de la machine Rhumkorff au milieu de la flamme d'une bougie ». Du Moncel pense que l'irradiation entre aussi pour beaucoup dans cette forme affectée par l'éclair, car tout foyer lumineux vu de loin paraît sphérique.

Du Moncel explique la manière dont s'opère le déplacement du globe par la présence de bandes transversales isolantes et d'un courant qui peut être excité par les décharges électriques. Enfin si le globe rencontre un bon conducteur communiquant avec le réservoir commun, il s'écoule sans bruit et disparaît. Mais, dans certains cas, le conducteur peut faire office d'excitateur et une explosion a lieu.

La théorie de Du Moncel est loin d'être complète. Il a compris, il est vrai, que la marche capricieuse du globe devait être causée par des couches de conductibilités différentes, tour à tour humides et isolantes, et il fait remarquer avec raison la présence fréquente d'un courant électrique à l'état latent, à l'extrémité duquel apparaîtrait le globule. D'ailleurs, ce courant est quelquefois visible. Ainsi, M. Larroque observa à Toulouse, le 16 juillet 1850, un éclair se dirigeant horizontalement de l'est à l'ouest, sous la forme d'une petite boule suivie d'un sillon tortueux de 1 à 2 mètres de long (1). C'était évidemment un cas particulier de foudre globulaire qui a été quelquefois remarqué et dont le dessin représente assez exactement un têtard.

Mais on ne peut plus suivre Du Moncel dans son hypothèse, quand il dit que le globe est toujours attiré vers le

(1) *Mémoires de l'Acad. des Sciences de Toulouse*, 3e série, T. VI, p. 351

nuage par un courant ascendant humide, car d'après lui c'est toujours par influence que le nuage orageux forme le globe de feu qui est en ce cas électrisé négativement, tandis qu'au contraire il est le plus souvent positif et produit directement par ce nuage.

De plus, le savant académicien n'explique pas d'une manière satisfaisante la disparition, avec détonation ou sans bruit, de la foudre globulaire. Enfin il laisse entièrement de côté la formation des boules de feu dans les nuages.

Gaston Planté nous éclaircit toutes ces difficultés.

Après avoir d'abord obtenu, à la surface d'un liquide, une sorte de bulle lumineuse à l'électrode positive de 250 couples secondaires, tandis que l'électrode négative est déjà en communication avec le liquide, il produisit, en employant 800 couples, un véritable globe de feu de 8 à 10 millimètres de diamètre, qui suit tous les mouvements imprimés à l'électrode (fig. 34).

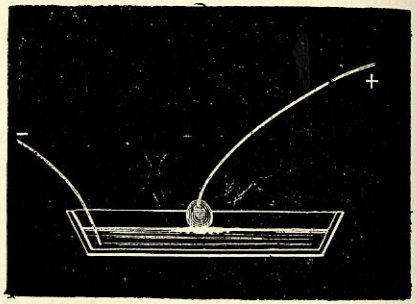

Fig. 34.

On doit donc constater avec Planté que la matière pondérable tend à prendre l'aspect globulaire sous l'influence d'une source puissante d'électricité dynamique et qu'il peut se former, grâce à une tension extrême, des globules de feu au sein de l'air mélangé de vapeur d'eau. M. Planté en déduit cette première loi : que la foudre globulaire doit être produite par un flux d'électricité

à l'état dynamique, dans lequel la quantité est jointe à la tension. Ces globes, semblables à une sorte d'*œuf électrique*, sans enveloppe de verre, se composent d'air raréfié incandescent et de gaz résultant de la décomposition de la vapeur d'eau également à l'état de raréfaction et d'incandescence (1).

C'est à la suite de détériorations arrivées aux lames de mica des condensateurs de sa machine rhéostatique, que Planté fut amené à expliquer par une expérience particulière, la marche lente et capricieuse de la foudre globulaire.

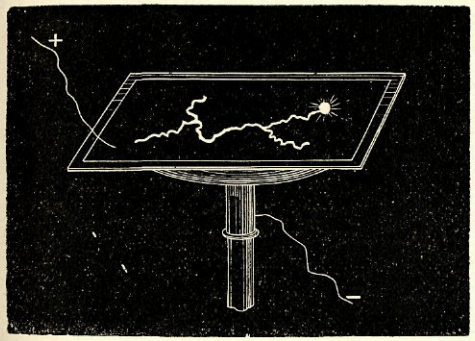

Fig. 35.

Si l'on touche avec l'électrode positive d'une batterie de 800 couples, l'armature supérieure d'un condensateur isolé à feuille de mica, dont l'armature inférieure communique déjà avec l'électrode négative, une étincelle éclate sur un des points où la feuille de mica est trop mince ou présente quelque fissure ; cette étincelle se met en mouvement sous la forme d'un globe brillant (fig. 35) accompagnée d'un bruissement particulier et trace lentement sur la lame d'étain du conducteur un sillon profond, sinueux et irrégulier : « Apparue en A (fig. 36), l'étincelle se ramifie

(1) *Phénom. Élect. de l'Atm.* G. Planté, p. 129.

en B jusqu'en C; là elle disparaît pour reparaître aussitôt au point B avec une telle rapidité et dans un intervalle de temps si peu appréciable, qu'elle semble avoir fait un bond ; elle se dirige ensuite vers D, là elle forme une nouvelle ramification qui s'arrête en E, reparaît en D, continue sa marche vers F et ainsi de suite. Quelquefois, comme dans le cas présent, l'étincelle se montre de nouveau plus loin, sur un point Q détaché du sillon principal pour s'arrêter ensuite en R et le phénomène ne cesse que lorsque la lame de mica ne présente plus de parties assez minces pour être traversées » (1).

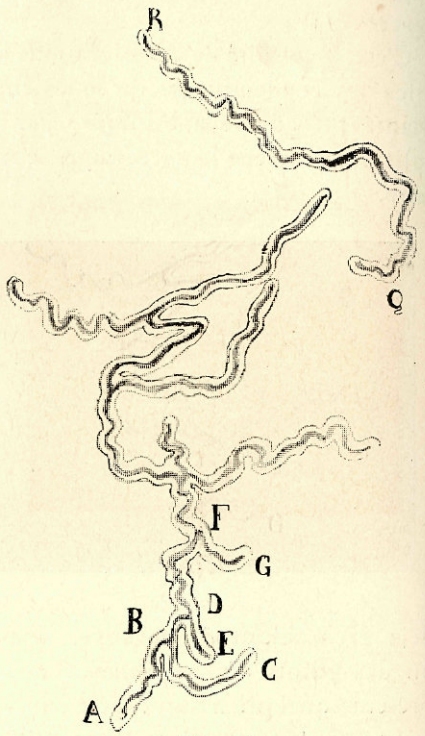

Fig. 36

Si l'on compare à cette expérience un cas de foudre globulaire, on se trouve en présence d'un condensateur naturel : une colonne d'air humide fortement électrisée joue le rôle de l'électrode positive séparée du sol, armature inférieure, par une couche d'air sec et isolant (fig. 37).

(1) *Comptes rendus de l'Acad. des Sciences* pour 1878, T. II, p. 253.

La production et le mouvement de la foudre globulaire se trouvent ainsi expliqués ; 1° si le globe est produit par un flux électrique de haute tension qui court le long d'une traînée humide, il suit les oscillations de l'électrode, c'est-à-dire de cette traînée humide ; 2° le globe peut encore provenir directement du nuage, armature supérieure du condensateur et il se met en marche, cherchant à se frayer un passage à travers la couche sèche et isolante pour aller retrouver ce sol négatif ; 3° si le globule est formé à distance, sous l'influence d'un nuage fortement électrisé, à la manière des feux Saint-Elme et des aigrettes lumineuses, il peut encore se mouvoir dans diverses directions, au-dessus d'une couche d'air sec et isolant.

Fig. 37

Planté rend également compte de toutes les particularités du phénomène.

Le bruissement que fait entendre souvent le globe de feu vient de la vaporisation rapide développée par le flux électrique. Par cette vaporisation, l'eau est décomposée et un excès d'hydrogène donne au globule sa couleur rougeâtre.

La disparition, avec ou sans détonation, s'effectue de la manière suivante : « Quand l'épaisseur de la couche d'air isolante qui sépare la couche nuageuse électrisée de la surface du sol devient trop grande sur le parcours du globe fulminant et, quand d'autre part, la quantité d'électricité fournie par la nuée orageuse n'augmente pas, l'écoulement

électrique cesse et la flamme globulaire disparaît sans bruit... » (1).

Mais si le nuage orageux se rapprochant du sol, de nouvelles quantités d'électricité viennent affluer à la surface de la couche isolante l'écoulement s'opère brusquement sous la forme d'une décharge proprement dite. C'est pourquoi partent dans tous les sens des traits sinueux qui frappent les objets environnants ; et Planté fait remarquer que ce n'est pas le globe lui-même qui produit cette détonation : « La source du phénomène final est dans le réservoir même d'électricité que renferme la nuée orageuse et qui se décharge au point où l'écoulement avait commencé sous la forme du globe de feu. »

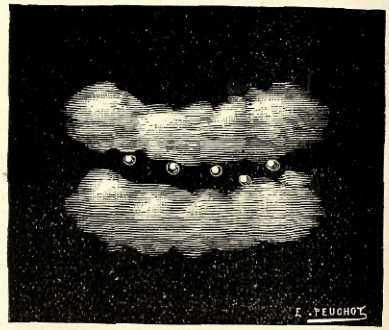

Fig. 38

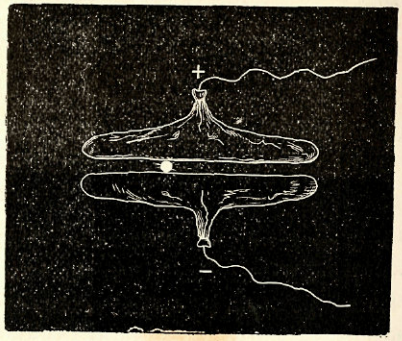

Fig. 39

Enfin le savant électricien reproduit d'une manière frappante ce qui se passe parfois dans le nuage même (fig. 38), en faisant jaillir

(1) *Phénom. Elect. de l'Atm.* G. Planté, p. 49.

un globe de feu entre deux tampons humides ou entre deux disques de papier à filtrer, humectés d'eau distillée (fig. 39).

6° Eclairs en chapelet. — Maintenant que nous connaissons la foudre globulaire, nous comprendrons mieux l'éclair en chapelet qui en est souvent le principe et qui dérive en même temps de l'éclair sinueux. Peltier dit avoir vu un éclair dont le ruban oscillant présenta une durée de deux secondes (1) et Du Moncel a parlé aussi d'un éclair à lumière gra-

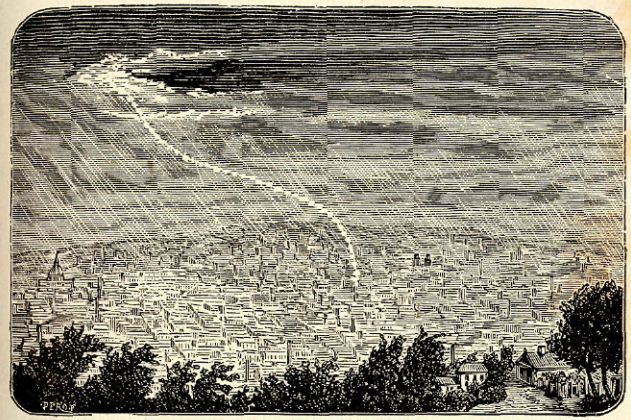

Fig. 40.

nulaire dont le sillon persistait pendant quelques instants (2). Mais ce phénomène a reçu son nom de Planté qui en a étudié les caractères et l'a définitivement classé. Il était à Meudon quand un orage éclata sur Paris le 18 août 1876 et de cet observatoire naturel, il put étudier les éclairs aux formes variées qui lui apparaissaient : « Mais le plus remarquable entre tous, dit-il, est celui qui s'est élancé de la nue vers le

(1) *Traité des Trombes*, Peltier, p. 114.
(2) *Etude sur les éclairs*, Du Moncel, p. 54.

sol en décrivant une courbe semblable à une S allongée (fig. 40) et qui est resté visible pendant un instant appréciable, en formant comme un chapelet de grains brillants, disséminés le long d'un filet lumineux très étroit. Cet éclair a paru frapper Paris dans la direction de Vaugirard » (1). Et les divers journaux qui rendirent compte de cet orage, parlèrent de globes de feu aperçus boulevard de Vaugirard, rue d'Assas...

D'après Planté, ce phénomène montre la transition de la forme ordinaire de la foudre en traits sinueux ou rectilignes à la forme globulaire ; si la condensation électrique est plus considérable sur quelques points du sillon de feu, les particules pourront acquérir un certain volume et donner naissance à des globes restant quelque temps visibles. « Ainsi, ajoute-t-il, les globes fulminants peuvent être considérés comme dérivant d'un éclair en chapelet, et si l'on ne voit pas, sur le point même où ils apparaissent, le trait de foudre d'où ils se sont détachés, c'est qu'on ne peut saisir de près tout l'ensemble du phénomène ». (2)

Des cas particuliers de foudre globulaire observés simultanément pendant un même orage à peu de distance l'un de l'autre peuvent provenir, d'après Planté, d'un éclair en chapelet, *désagrégé* pour ainsi dire, et que le savant physicien appelle *fragments globulaires* ; ils lui semblent être un diminutif de l'éclair en boule.

Les faits paraissent lui donner raison, et il en cite de fort nombreux à l'appui de sa théorie ; par exemple :

Le 24 février 1884 (fig. 41) la foudre tombe sur le théâtre d'Amiens en traversant une vitre de fenêtre et apparaît dans les coulisses sous la forme d'une petite boule de feu

(1) *Phénom. Elect. de l'Atm.* G. Planté, p. 62.
(2) *La Nature, 1877.*

bleuâtre ; au même moment, la foudre frappait aussi une

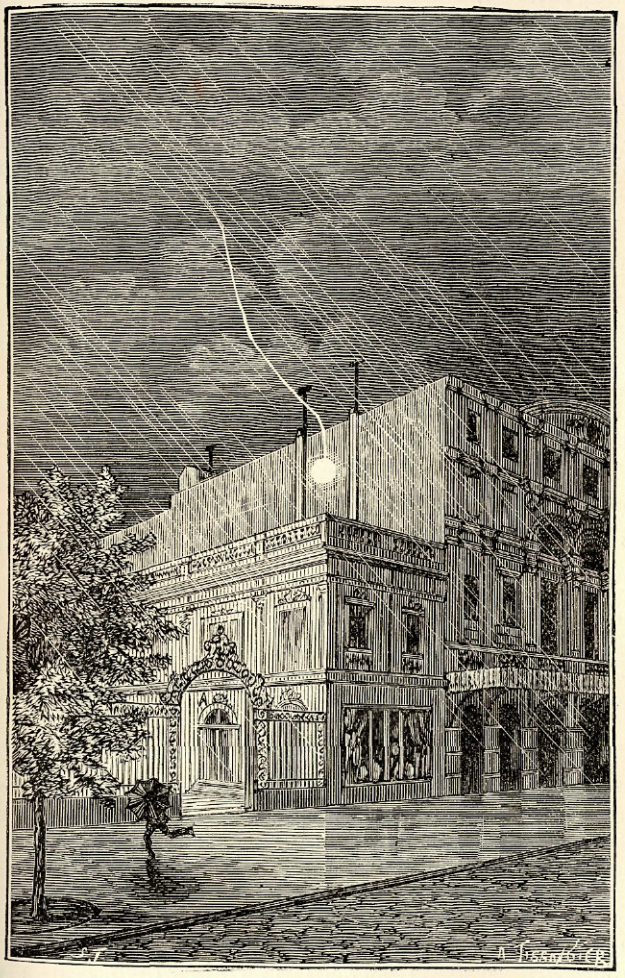

Fig. 41.

maison située à 200 *m.* de là et un globe de feu fut égale-

ment vu dans l'intérieur où il éclata bruyamment ; enfin, à cinq autres endroits différents et rapprochés les uns des autres, on constata l'apparition de la foudre sous la forme globulaire.

Aux contradicteurs qui ne voudraient voir dans l'éclair en chapelet qu'un sillon en hélice vu de loin, Planté rappelle l'expérience dans laquelle il a obtenu des globules incandescents formés le long d'un fil métallique fondu par un courant voltaïque (2).

D'ailleurs, M. Renou se souvient avoir été témoin d'un éclair en chapelet aux Ponts-de-Braye, le 20 juillet 1859, et il le décrit de la manière suivante : « La foudre traça un sillon presque vertical, mais un peu sinueux, formé de boules presque tangentes absolument comme un chapelet et d'un éclat excessif. Cette apparition a été presque instantanée, mais, d'après l'impression qu'elle m'a laissée, j'ai évalué le diamètre des boules à la dixième partie du diamètre du soleil. Un angle de 3 minutes, à 200 ou 250 mètres, donnerait à ces sphères un diamètre de 0,20 *m.* C'est le diamètre qu'on a attribué à ces globes de feu, qu'on a vus plusieurs fois traverser lentement des intérieurs d'appartement » (3).

Le professeur Klossovsky a eu également l'occasion d'observer le 7 août 1889 un éclair « ayant la forme d'une pointillée gigantesque... un éclair en chapelet, ajoute-t-il, a été également observé par M. Bochko à Kivertzy dans le gouvernement de Volhynie » (4).

C'était probablement aussi un éclair de ce genre qui

(1) *Phénom. Elect de l'Atm.* G. Planté, p. 218 et suiv.
(2) *Comptes rendus de l'Acad. des Sciences pour 1876*, T. II, p. 484.
(3) *Comptes rendus de l'Acad. des Sciences pour 1876*, T. II, p. 1002.
(4) *Editions de l'Observatoire météorologique d'Odessa.*

avait détruit l'église d'un village près de Brest en 1718, car : « on avait vu trois globes de feu de trois pieds et demi de diamètre chacun, réunis en un gros tourbillon de flammes qui était venu rapidement percer l'église à deux pieds au-dessus du rez-de-chaussée, avait tué deux personnes de quatre qui sonnaient et fait sauter le toit de l'église comme aurait fait une mine » (1).

MM. Daguin, Joule, Lawrence... appuient de leurs observations ces faits caractéristiques et tous ces nombreux exemples sont venus confirmer la théorie de Planté sur la formation des éclairs en chapelet et de la foudre globulaire, théorie admise aujourd'hui par la plupart des météorologistes.

M. Prinz, attaché à l'observatoire de Bruxelles, voudrait généraliser la question et conclure à une seule classe d'éclairs, à la suite de ses études détaillées sur leur structure par l'examen photographique. Aidé des travaux du docteur Kayser de Berlin, de MM. Moussette et Trouvelot sur les stries transversales observées dans la photographie d'un sillon lumineux, il pense que ces striations indiquent un acheminement vers l'éclair en chapelet ou plus exactement vers l'éclair en boule. Il n'y aurait entre les diverses formes de la décharge qu'une différence de rapidité. Pour M. Prinz, le sillon lumineux, que notre œil croit souvent suivre pendant un temps appréciable et que la plaque sensible conserve moins d'un millionième de seconde, n'est que l'addition de tous les points par lesquels l'étincelle a passé (2).

M. Moussette avait déjà formulé en 1886 toute une

(1) *Mémoires de l'Acad. des Sciences, 1719*, p. 22.
(2) *Acad. royale des sciences de Belgique* (Séance du 4 août 1888) et *Rev. Intern. de l'Elect., 1888*, p. 387.

théorie mécanique de la foudre (1). Le sillon lumineux décrit par l'éclair ne serait que la trajectoire de la foudre globulaire. La foudre ne serait donc qu'un projectile.

7° Bolides. — Ne doit-on pas rattacher à la foudre globulaire certains cas de bolide qui présentent les mêmes caractères? On croit peut-être trop souvent à la présence de corps en ignition qui viennent à s'éteindre ou de fragments de matières solides portées au rouge pendant leur chute sur la surface terrestre par le frottement des couches atmosphériques. Évidemment ces cas se présentent fréquemment et on en a souvent entendu parler; on peut encore avoir ramassé soi-même des fragments de météorites auxquels il faut attribuer une origine extra-terrestre. Mais bien souvent aussi on a vu, par des temps orageux, des globes de feu sillonner l'atmosphère dans une région fort basse et l'on n'a rien retrouvé des soi-disants bolides. Tel est le cas de M. Brière, qui en observe un à Avranches le 7 juin 1878, à dix heures du soir, par un temps couvert: « dans la direction du N.-O., entre l'étoile polaire et les deux étoiles δ et β de la Grande-Ourse, apparut subitement un globe de feu de la forme d'une énorme poire très allongée paraissant avoir 15 centimètres de diamètre à sa base, qui se trouvait en avant » (2). Le 22 juin suivant, M. Villarceau, dans le Nord, par un temps orageux, vit un météore ascendant lancer des étincelles et semblable à une sorte de chandelle romaine dans la fin de sa course. En 1886, à Paris, M. Durier vit une boule lumineuse, de forme un

(1) *Rev. Intern. de l'Elect.*, T. VII, p. 210, et *Comptes rendus de l'Acad. des Sciences pour 1886*, T. II,

(2) *Comptes rendus de l'Acad. des Sciences pour 1878*, T, I, p. 1510.

peu allongée, qui s'est éclipsée sans bruit après une trajectoire de 20 à 25° (1).

Le 3 juin 1888, M. Bourgerel assure encore avoir observé à Bollène (Vaucluse), un bolide vers onze heures du soir; ce globe de feu, dont le diamètre était plus gros que celui de la planète Jupiter, répandit d'abord une lumière blanche qui passa bientôt au rouge; il disparut en laissant une légère trace lumineuse derrière lui (2).

M. Reuter de Luxembourg a vu à Steinsel, le 3 février 1889, une grosse boule répandant une lumière rouge, qui passa en sifflant au-dessus de la forêt de Grünenwald. Le bolide traversa la vallée, brisa un vieux hêtre placé dans le voisinage du château de Scherff et se divisa en mille étincelles brillantes avec une forte détonation (3).

Ne reconnaissons-nous pas là de véritables exemples de foudre globulaire?

M. Oltramare est sans doute de cet avis, car il explique de cette manière le bolide observé à Genève le 7 juin 1879, à 9 heures 30 du soir: un globe de feu semblable à la lune émergea d'une masse de nuages; d'abord blanchâtre, il prit une couleur rouge en s'éloignant et disparut au bout de trois ou quatre secondes derrière la montagne des Voirons.

M. Oltramare n'hésite pas à déclarer que l'on était en présence d'un éclair en boule et sa théorie, que nous résumons ici, peut être considérée comme un nouvel aperçu sur la foudre globulaire: De la forme d'un nuage dépend, pour ainsi dire, sa tension électrique; elle est plus forte dans les parties saillantes que dans les parties rentrantes

(1) *Comptes rendus de l'Acad. des Sciences pour 1886*, T. I.

(2) *La Nature, Chron. météorol., 1888*, T. I.

(3) *Idem, Chron. météorol, 1889*, T. I.

et si la pointe d'un nuage rapproché du sol possède un potentiel très élevé, il y aura décharge entre cette pointe et le nuage ; mais il peut se faire aussi que l'électricité s'en échappe entraînant avec elle une portion de vapeur condensée qui constituera un nuage de petite dimension fortement électrisé et complètement abandonné à lui-même sous l'action de l'électricité libre à sa surface. Il prend alors la forme sphérique sous l'action répulsive du fluide et ce bolide n'est qu'un éclair en boule à l'état naissant.

« Ce bolide, dit M. Oltramare, ne tardera pas à se mettre en mouvement, repoussé d'une part par la partie restante de la masse nuageuse qui possède la même électricité que lui et attiré d'un autre côté vers les régions atmosphériques qui possèdent une électricité contraire ; il en résultera pour le mobile, une certaine direction qui tendra à le transporter vers les localités voisines de la terre qui sont plus particulièrement dans un état négatif »(1).

John Murray était allé beaucoup plus loin ; il regardait comme des phénomènes électriques la plupart des météores lumineux : les étoiles filantes, les bolides, les comètes, les nébuleuses, et il assimilait aussi les bolides à la foudre globulaire (2). Nous ne le suivrons pas dans toutes ses propositions ; nous rappellerons cependant la présence incontestée de l'électricité dans l'atmosphère et les effets si différents et si puissants qu'elle doit y produire.

(1) *Comptes rendus de l'Acad. des Sciences pour 1879*, T. I, p. 1319.
(2) *Treatise of atmospherical electricity, John Murray*, p. 40, *1831*, London.

IX. — Phénomènes d'induction et tension électrique pendant les orages.

Le potentiel électrique qui s'élève sur quelques points déterminés, d'une façon anormale pendant les orages, produit des effets particuliers sur les électromètres et sur les instruments électro magnétiques.

Ce sont des courants d'induction qui naissent à une période du centre orageux et qui agissent sur les appareils sensibles placés dans un certain rayon. L'électromètre a déjà indiqué l'approche d'un orage par des déviations plus accentuées ; puis de fréquents changements de signe annoncent les décharges qui ont lieu à une distance donnée et lorsque l'orage est près de l'observateur ce dernier note en général de l'électricité négative, développée par le passage du nuage orageux positif. La déviation augmente, devient très grande au moment de la décharge pour retomber ensuite à *o* et recommencer à croître jusqu'à une nouvelle décharge. Si l'on opère avec un électroscope de Bohnenberger : « on voit, dit M. Palmieri, la feuille d'or qui s'avançait lentement vers les deux pôles de la pile sèche s'en approcher brusquement quand l'éclair brille, s'en éloigner de même et accuser un changement d'électricité » (1).

L'orage s'éloigne, se recharge plus loin : l'électromètre indique des potentiels différents, puis enfin il revient au minimum qu'il marquait avant l'apparition du nuage orageux : « Avant et après l'orage, dit le P. Denza,

(1) *Lois et origines de l'élect. atm.* Luigi Palmieri, p. 40.

l'électromètre marque toujours *o* ou des tensions très petites et cela pendant plusieurs heures » (1).

De même, ces courants induits agissent sur les aiguilles aimantées des boussoles, en modifient momentanément le champ magnétique et circulent aussi dans le fil des galvanomètres et des bobines de téléphone. M. Colladon fut un des premiers qui étudia les déviations de l'aiguille d'un galvanomètre sous l'influence de l'électricité atmosphérique. « Pendant un orage qui eut lieu à quelque distance de Paris, dit-il, mon galvanomètre accusa des déviations qui atteignirent jusqu'à 18°, bien que l'on n'aperçût aucun nuage orageux jusqu'à 30° du zénith (2). »

Il fait aussi remarquer que chaque éclair était immédiatement suivi, parfois même précédé d'un changement subit dans le sens de la déviation ou d'un accroissement brusque ; dans quelques cas la déviation passait instantanément du maximum positif au maximum négatif (3), c'est comme la vérification des résultats obtenus avec les électromètres.

Les plaques téléphoniques, par leur extrême sensibilité, devaient évidemment être impressionnées par ces courants induits. M. Landerer répéta en effet, en 1878, les expériences de M. Colladon et se servit d'une sorte de ligne télégraphique de 200 *m.* de long dans le circuit de laquelle étaient intercalés un galvanomètre et une paire de téléphones. Il put constater, au moment de la décharge, la présence de courants qui produisaient une sorte de pétillement ou un bruit sec suivant que cette décharge était plus ou moins éloignée (4).

(1) *Comptes rendus de l'Acad. des Sciences pour 1879*, T. II, p, 153.
(2) *Annales de Chim. et de Phys.* T. XXXII, p. 74.
(3) *Comptes rendus de l'Acad. des Sciences pour 1881*, T. II, p. 480.
(4) *Comptes rendus de l'Acad. des Sciences pour 1881*, T. II, p. 588.

M. Thury de Genève entendit aussi, avec un téléphone, un éclair éclater à 40 *kilom.* du lieu d'observation. M. de Lalagade augmenta la sensibilité de cet appareil au moyen d'un microphone. Enfin en 1881, il perfectionna encore son installation : il disposa sur un terrain 12 tiges d'acier aimantées de 0,007 *m.* de diamètre et de 2 *m.* de long ; chacune de ces barres était recouverte sur un cinquième de sa longueur de 12 petites bobines revêtues de fil fin et tous les bouts de fil des bobines enroulées dans le même sens venaient se réunir à un même conducteur, ce qui permettait de recueillir et de grouper tous les courants produits sans augmenter la résistance totale de l'appareil. Les deux conducteurs s'attachaient à une paire de téléphones. M. de Lalagade réussit à entendre avant chaque éclair, même très éloigné, un bruissement caractéristique suivi d'un coup sec annonçant la décharge.(1) De plus il convient de remarquer ici que ces courants peuvent devenir à un moment donné d'une énergie extrême et par suite un danger pour les êtres organisés : au moment d'une décharge éloignée, il se produit une sorte de décharge secondaire dans cet extra-courant ; c'est ce que l'on appelle le choc en retour. Ces déviations et ces courants induits, nous le verrons, ont été aussi observés pendant les tremblements de terre.

Lorsque l'orage éclate sur le lieu des observations, les appareils sensibles qui avaient averti de son approche sont affolés et impuissants à noter tous les phénomènes divers qui se produisent alors ; la tension électrique est extrême, puisque c'est l'expression même de l'orage et ce qui le constitue. Si le nuage orageux est trop loin du sol pour

(1) *Comptes rendus de l'Acad. des Sciences pour 1882*, T. I, p. 1304.

provoquer une décharge, son potentiel élevé donne encore lieu à des manifestations lumineuses analogues aux aigrettes qui apparaissent sur le conducteur d'une machine électrique quand l'excitateur est suffisamment éloigné.

Suivant la composition des corps, leur forme, leur conductibilité, les pointes étincellent (fig. 42), des aiguilles lumineuses jaillissent des paratonnerres et des mâts des navires ; des flammes s'échappent du sol, des espaces se trouvent embrasés d'une lumière diffuse. L'équilibre tend toujours à se rétablir entre la terre et l'atmosphère.

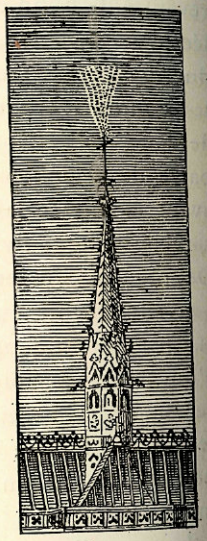

Fig. 42.

Les anciens, frappés par ces lueurs mystérieuses, les considéraient comme des prodiges et voyaient dans leur apparition des présages heureux ou malheureux selon qu'elles étaient isolées ou multiples : c'était l'*astre d'Hélène*, ou bien *Castor et Pollux*... Les chefs d'expédition les désignaient à leurs soldats pour exciter leur ardeur. Les javelots romains étincellent la nuit qui précède la victoire de Posthumius sur les Sabins et c'est une prédiction de triomphe ; de même une étoile brillante surmonte la lance de Gylippus allant à Syracuse (1) et le ciel favorise du même prodige Bélisaire marchant contre les Vandales (2).

Si au moyen âge le nom change, la signification reste la même et Christophe Colomb encourage ses matelots terri-

(1) *Nat. Quaest.* Senèque, *lib. I*, cap. I.
(2) *De bell. Vand.* Procope, *lib. 2*, *Cap. 2.*

fiés par l'orage en leur montrant les *feux Saint-Elme* qui couronnent les mâts de sa caravelle.

Plus tard, sans connaître exactement la raison de ces feux électriques, on en soupçonnait l'origine, car en 1760 le docteur Giovanni Bianchini rappelle que sur un des bastions du château de Duino, dans le Frioul, sur les bords de l'Adriatique, se dressait, de temps immémorial, une pique qui servait d'avertisseur des orages. Le soldat de garde présentait fréquemment à cette pique la pointe de sa hallebarde et, quand il en voyait jaillir des étincelles, il sonnait une cloche pour avertir les travailleurs des champs et les pêcheurs que le temps était à l'orage (1).

Enfin de nos jours on recueille avec soin tous les exemples de ces phénomènes afin d'arriver à en connaître les diverses particularités. Ici ce sont des personnes qui ont vu des auréoles lumineuses entourer leur chapeau, les recouvrir d'une sorte de vêtement de feu, crépiter à la crinière de leurs chevaux et ces flammes produisaient de vifs sifflements (2). Là, ce sont des végétaux, des plantes, des arbres, qui paraissent illuminés dans toutes leurs ramures et M. Larroque fut témoin d'un feu électrique qui consuma le pollen d'un lys dans son jardin (3). Ces manifestations peuvent se multiplier et c'est ainsi que l'on a assisté dans le Tyrol à l'illumination d'une forêt de pins (4).

Dans certains cas où le potentiel électrique est très élevé, les nuages, les brouillards peuvent devenir lumi-

(1) *Mémoires de l'Acad. des Sciences*, 1764, p. 408.
(2) *Annales de Chim. et de Phys.* T. X, p. 284, *Journal de Genève*, juin 1880, *Eclairs et Tonnerre*, De Fonvielle...
(3) *Comptes rendus de l'Acad. des Sciences*, pour 1881, T, II, p. 394.
(4) *Telegraphic Journal*, 1880.

neux par eux-mêmes ; la pluie et la grêle sont souvent phosphorescentes et les gouttes ou les grêlons, en frappant sur le sol, en font jaillir autant d'étincelles ; Halley, Bergmann, Bertholon, Rosier Nicholson, Arago, Becquerel, en citent de nombreux exemples. Enfin, le Dr Robinson d'Arnagh fut le témoin en mer d'une manifestation électrique assez rare : une lumière intense éclairait et embrassait un espace d'environ 400 m. et les contours de cette nappe lumineuse étaient nettement déterminés.

Nous croyons voir un fait du même genre dans l'éclair diffus observé en 1881 par M. Trécul à la surface du sol (1). Il prétend cependant que cette illumination soudaine ne doit pas être confondue avec les phénomènes décrits par Arago et appelés feux Saint-Elme, qui persistent pendant un temps appréciable ; il fait remarquer que l'éclair dont il parle était instantané. Cette raison ne semble pas suffisante, car l'influence du nuage électrisé qui provoque ces manifestations peut être, soit d'une durée plus ou moins sensible, soit instantanée et s'il y a décharge violente sur un autre point, cette lueur diffuse pourrait bien n'être qu'une manifestation secondaire de la décharge principale.

M. Trécul veut encore classer à part un phénomène singulier qu'il avait remarqué pendant l'orage du 19 août 1880 : « Les étincelles, dit-il, ou plutôt les traits fulgurants qui traversaient horizontalement la nue, avaient une dimension considérable. Quelques-uns avaient en apparence la largeur de la main... Plusieurs autres s'élevaient verticalement de derrière les arbres de la place Jussieu, à une distance qui devait être comprise dans l'enceinte de

(1) *Comptes rendus de l'Acad. des Sciences*, pour 1881, T, I, p. 775.

l'entrepôt des vins. Il me semble qu'ils partaient des paratonnerres de cet entrepôt, que pourtant je ne distinguais pas, la nuit commençant » (1). C'est là, selon lui, étant donné l'instantanéité du trait lumineux, un cas d'éclair ascendant.

John Murray disait aussi à ce sujet : « Quelquefois la foudre monte de la terre vers le ciel ; nous n'avons qu'une seule fois été témoin de ce fait, mais si remarquable qu'il n'était pas possible de s'y méprendre : l'éclair ascendant se mouvait en spirale » (2).

Il ne nous semble guère possible d'admettre ces cas exceptionnels de foudre ascendante. L'éclair n'est en quelque sorte ni descendant ni ascendant : la foudre éclate entre deux points et le trait de feu apparaît instantanément sur le trajet du courant déjà formé, sans qu'un moment appréciable à nos sens puisse représenter le temps qu'il met à aller d'un point à un autre ; l'œil peut donc être facilement trompé et ces flammes ascendantes nous paraissent plus vraisemblablement devoir rentrer dans la catégorie des diverses manifestations lumineuses développées sous l'influence d'un nuage orageux. On a souvent vu en effet, lorsque la tension électrique est extrême, des flammes légères et rapides s'élancer du sol et disparaître avec une sorte de bruissement ; or il est reconnu que ce ne sont là que des variétés d'aigrettes et de feux St-Elme. C'est pourquoi les premiers observateurs crurent naturellement, en les voyant, à des cas de foudre ascendante.

Le marquis de Maffei en était persuadé (3) et l'abbé de Cénéda exprime la même opinion ; Bouguer, de Vignoles, citent

(1) *Comptes rendus de l'Acad. des sciences* pour 1880, T. II, p. 407.
(2) *Treatise of atmospherical electricity*, 1831, London.
(3) *Della formazione dei fulmini*, de Maffei, p. 330, 1773.

des faits semblables et l'abbé Chappe d'Auteroche en avait été témoin aux environs de Queretaro, lorsqu'il fut envoyé en Amérique observer le passage de Vénus sur le soleil en 1769. Bertholon en relève de nombreux exemples et, convaincu de la fréquence des coups de foudre ascendants, il en tire cette singulière conclusion : « Nous croyons, dit-il, que c'est ici le cas d'appliquer ce que dit si ingénieusement M. de Fontenelle : En physique, dès qu'une chose peut être de deux façons, elle est ordinairement de celle qui est le plus contraire aux apparences. Il est possible que la terre tourne autour du soleil ou le soleil autour de la terre et c'est ce dernier qui paraît aux yeux de tout le monde : ce sera donc le premier qui sera le vrai. La rosée peut également tomber d'une certaine région de l'air ou s'élever de la terre comme une vapeur jusqu'à cette région : tout le monde juge qu'elle tombe. C'est un don du ciel, dit-on, il en favorise la terre, etc... Il n'en est rien, la rosée s'élève de la terre. De même, peut-on ajouter, la foudre peut tomber sur la terre ou s'en élever. Presque tout le monde pense qu'elle s'élance toujours des nuées sur la terre ; elle s'élève donc le plus souvent de la terre » (1) .

En résumé, si le potentiel développé sur le sol par un nuage éloigné est peu élevé, l'écoulement de l'électricité par les corps conducteurs se fait lentement, la reconstitution s'opère silencieusement, sans manifestation visible. Le flux devient-il plus rapide par suite d'une tension plus grande, la lumière apparaît et subsiste un temps relativement long. Enfin, si le potentiel du sol est extrême, en plus de ces aigrettes, des flammes rapides peuvent s'échapper du sol en divers points (fig. 43). D'ailleurs il est facile

(2) *Voyage en Californie*, p. 34.
(1) *De l'électricité des météores*, Bertholon, T. I, p. 354.

de se rendre compte par analogie de toutes ces manifestations lumineuses : si le conducteur d'une machine puissante est muni d'une tige métallique on obtient une lueur bleuâtre autour de cette tige et autour de la boule du conducteur : « Approchons de la tige lumineuse, dit M. Cazin, une grosse boule de métal que nous tenons à la main, la lueur est remplacée par une aigrette violacée qui fait entendre un léger bruissement. » (1) Si l'on rapproche les deux conducteurs, on a le spectacle d'une pluie de feu traversant l'air dans l'intervalle qui les sépare, avec un bruit semblable à celui d'une poussière tombant sur une surface résistante. « En électrisant négativement la tige, on observe un phénomène analogue. La forme de l'aigrette change, mais dans toutes les apparences que l'on rencontre, on distingue le conducteur positif du conducteur négatif par les deux formes lumineuses qui s'en détachent. Sur le premier, les filets lumineux convergent en un même point, sur le deuxième ils couvrent une certaine étendue superficielle. »

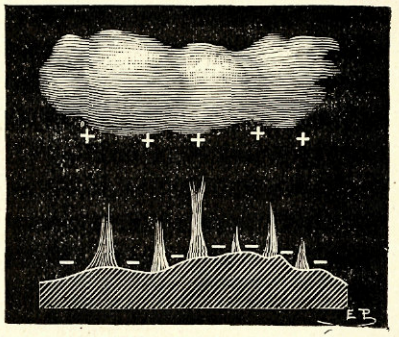

Fig. 43.

N'est-ce pas là la description des lueurs, feux Saint-Elme, aigrettes, espaces lumineux, qui apparaissent sur le sol ou dans les nuages? Et leur forme, leur couleur, leur étendue dépendent de la distance qui sépare les conducteurs des

(1) *L'étincelle électrique*, Cazin, p. 99 et suivantes.

milieux interposés ou du signe de la tension électrique qui les produit.

X. — Tonnerre.

Pour les anciens, ce phénomène est des plus simples : Pline, Tite-Live et Senèque expliquent le bruit du tonnerre par le choc de deux énormes nuées (1). Descartes n'en donne pas de raison plus profonde : « Les nuages tombent les uns sur les autres, se choquent et le tonnerre n'est pas autre chose. » (2) Et ce n'est qu'après les expériences de de Romas et de Franklin que l'on s'avisa de chercher une explication plus scientifique et plus en rapport avec les nouvelles théories. En conséquence, on pensa que la foudre en éclatant, refoule l'air et fait le vide sur son passage, et le tonnerre serait le bruit produit par la rentrée brusque de l'air dans ce vide momentané.

D'après Pouillet, cette explication n'est pas suffisante, car le boulet qui fend l'air ne fait entendre qu'un sifflement et il devrait au contraire produire un bruit analogue à celui du tonnerre. Il remarque d'abord que la foudre ne peut éclater entre deux corps que s'il y a décomposition et recomposition électrique de toutes les parties qu'elle traverse ; il doit donc en résulter des vibrations plus ou moins violentes dans la matière pondérable et le tonnerre serait le résultat de toutes ces vibrations. Si l'on considère un éclair de quelques mille mètres de longueur, la lumière devra briller successivement, quoique à des instants très rapprochés, entre tous les intervalles qui séparent les molécules aériennes,

(1) *Quaest. nat.* Senèque, *lib. II, cap. XXVII.*
(2) *Œuvres complètes*, Descartes, T. V, p. 254.

c'est-à-dire sur tout son parcours. L'ébranlement se produirait donc en même temps que l'éclair, mais étant donné la différence de propagation du son et de la lumière, il s'en suit que si un observateur se trouve à 340 *m.* du lieu où apparaît l'éclair, il verra d'abord un éclat de lumière, puis le bruit produit par la vibration excitée dans la couche la plus voisine lui parviendra au bout d'une seconde et ensuite il entendra successivement sans interruption le bruit des couches plus éloignées.

Cette théorie pourrait, jusqu'à un certain point, rendre compte des roulements prolongés qui nous frappent l'oreille et qui, d'abord intenses, vont en s'affaiblissant, mais Pouillet oublie complètement de parler de l'écho, qui joue cependant ici un rôle important.

En effet, deux cas peuvent se produire :

1° Si la foudre éclate entre deux nuages ou bien frappe un point du sol éloigné, c'est une violente détonation, un éclat brusque, mais il nous arrive redit par tous les échos nuageux qui se renvoient, à cause de leur densité, toutes ces vibrations sonores jusqu'à six, sept, huit et dix fois ; ce qui produit un roulement dont la durée peut aller jusqu'à 30 et 35 secondes. De même si, par un ciel pur, un coup de canon est tiré en mer, on n'entendra qu'une seule détonation ; au contraire, si le temps est couvert, elle sera répétée quelquefois pendant vingt ou trente secondes. Arago cite une observation faite par Scoresby qui entendit, près du lac de Killarney, la détonation d'un coup de pistolet répétée pendant une demi-minute (1).

2° Si le sol est foudroyé près de nous, la détonation se change en ce déchirement strident si caractérisé qui, en

(1) *Notice sur le Tonnerre*, Arago, p. 77 et 299.

réalité, constitue seul le bruit réel du tonnerre : il est produit par la vaporisation rapide des vésicules d'eau que le courant traverse et par la violente dilatation et la brusque contraction qui en résultent; puis l'écho s'en va, répétant ce déchirement, et le transforme ainsi en un roulement prolongé pour des observateurs plus éloignés.

Nous pensons donc qu'il n'est pas besoin de faire intervenir une autre cause, comme le docteur Hooke, Robinson et Becquerel l'ont essayé (1) : ils trouvent une analogie entre les zigzags d'un éclair et ces roulements qu'ils prétendent être produits chacun par un des traits de feu; ces traits sillonnent l'espace à des distances diverses et donnent naissance à des ondes sonores qui mettent des temps inégaux pour venir frapper l'oreille d'un observateur. C'est une variante de la théorie de Pouillet. On a voulu s'appuyer sur ces suppositions et calculer la longueur d'un éclair d'après la durée du roulement. Nous n'insisterons pas sur ce calcul dont l'exactitude nous paraît douteuse; le seul qu'il soit permis de faire approximativement est celui, bien connu, de la distance à laquelle nous nous trouvons de l'orage par le temps qui s'écoule entre l'apparition de l'éclair et le coup de tonnerre.

XI. Effets de la foudre

Toutes les causes qui ont produit un dégagement d'électricité peuvent devenir aussi les effets de ce dégagement. Toute action mécanique, toute réaction chimique et variations calorifiques sont directement ou par influence le principe d'un courant; à son tour ce courant est capable de reproduire dans tous leurs détails ces actions et réactions. C'est pourquoi les effets de l'électricité sont pour ainsi dire universels, ainsi que ses causes de production; ils sont ordinairement divisés en effets lumineux, mécaniques, calorifiques, chimiques et physiologiques; la foudre, cette grande manifestation de l'électricité atmosphérique, doit donc produire puissamment tous ces différents effets.

(1) *Traité d'électricité*, Becquerel, T. IV, p. 133.

Nous ne suivrons pas exactement cette division, ce serait revenir sur ce qu'on trouve partout tant de fois raconté. Du reste, on s'écarte presque toujours forcément de cette classification, puisque souvent il peut y avoir à la fois réaction chimique et dégagement de chaleur et de lumière, force mécanique et lésions organiques. Nous dirons seulement quelques mots des effets qui nous paraissent les plus importants et que nous divisons ainsi :

1° Effets de fusion ;
2° Effets physiologiques ;
3° Effets de la foudre sur les arbres.

1° Effets de fusion. La chaleur développée par un courant est manifeste ; elle est surtout extrême si le conducteur offre, sur certains points, une grande résistance à son passage ou bien si un bon conducteur ne livre pas une surface suffisante à son intensité ; alors, le conducteur s'échauffe et il est souvent rougi, fondu ou même volatilisé.

Dans l'éclair, la résistance opposée au passage du courant produit une telle chaleur qu'elle vaporise l'eau et la décompose, le vide se fait et la traînée lumineuse apparaît. C'est l'effet calorifique uni à l'action chimique.

Nous voyons encore dans les fulgurites ou tubes fulminaires jusqu'à quel degré d'intensité peut aller l'action calo-

rifique de la foudre, lorsque la résistance vient augmenter ses effets. Elle opère la fusion superficielle de sables et même de certaines roches.

Ce phénomène fut observé la première fois en 1711 par le pasteur Hermann, en Silésie, puis en 1805 dans les landes de Paderborn. On croyait d'abord être en présence d'incrustations, de dépôts ou de cristallisations agglomérées autour de végétaux disparus, mais certains indices vinrent bientôt révéler leur véritable origine : Le 3 septembre 1789, la foudre frappa un homme dans le parc du

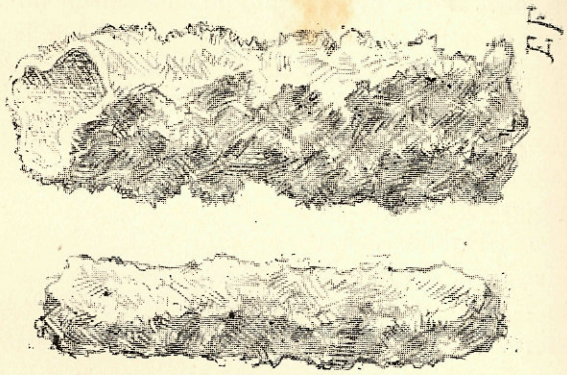

Fig. 44.

comte d'Aylesford, le courant suit le bâton que la victime avait à la main et perce le sol d'un trou de cinq pieds de profondeur. On trouva, en creusant, des blocs de sable vitrifié et des traces évidentes de fusion sur des fragments quartzeux.

Le docteur Heutzen, puis Hagen de Kœnigsberg trouvèrent des fulgurites après un coup de foudre qu'ils avaient observé et ils purent ainsi être renseignés exactement sur leur mode de formation.

Enfin l'expérience de Savart, Beudant et Hachette ne laissa plus aucun doute à cet égard ; on sait qu'ils obtinrent des tubes fulminaires en déchargeant la puissante batterie du Conservatoire des Arts et Métiers à travers un mélange de verre pilé et de sable additionné de sel marin pour en faciliter la fusion (fig. 44).

Les fulgurites extraites du sol ressemblent à des tuyaux irréguliers et résultent de la fusion des sables siliceux ; ces tuyaux sont lisses en dedans, sur le passage du courant et granuleux à l'extérieur, car les grains de sable n'y sont qu'à demi fondus. Ces tubes fulminaires peuvent atteindre jusqu'à cinq, six et quelquefois dix et douze mètres de longueur ; ils donnent l'empreinte exacte du trait de foudre et sont, comme lui, tantôt simples, tantôt ramifiés.

On trouve des fulgurites un peu partout, mais elles sont surtout en grande abondance dans les pays sablonneux et humides. De plus, les rochers foudroyés présentent aussi souvent des traces de fusion, et cette action électrique, analogue aux précédentes, se rencontre particulièrement au sommet des hautes montagnes. Saussure en a vu au Mont-Blanc et Ramond au pic du Midi. MM. Albert Tissandier et Baylac l'ont aussi observé sur un bloc de diorite granitoïde au pic du Midi, et la partie fondue constituait une traînée qui dessinait exactement l'étincelle et se ramifiait comme elle (1).

D'après M. Brun de Genève, certaines roches, par leur exposition, paraissent spécialement destinées à être frappées par la foudre, et on trouve fréquemment des traces de fusion derrière le dôme du Mont-Blanc, sur les blocs appelés du nom significatif de *Rochers des foudroyés* (2).

(1) *La Nature, 1882*, T. I, p. 77.
(2) *Idem, 1880*, T. II, p. 358.

Les effets calorifiques de la foudre produisent parfois aussi la fusion des métaux ; ceux-ci sont à peine échauffés par le passage du courant, grâce à leur bonne conductibilité si leur section est suffisante, mais dans le cas contraire, ils sont fondus ou même volatilisés.

La foudre soude l'un à l'autre les anneaux d'une chaîne; elle fond les objets, les ornements métalliques qu'un individu foudroyé porte sur lui ; elle atteint plus particulièrement, bien entendu, les métaux exposés à l'air, les piques des grilles, les pointes de paratonnerre qui subissent souvent aussi des commencements de fusion. Enfin, ces effets sont des plus variés, ils sont bien connus et trop nombreux pour être racontés ; cependant nous en citerons deux qui présentent quelques particularités.

En 1882, la foudre frappa au sommet du Puy de Dôme l'anémomètre à quatre hémisphères en cuivre rouge. M. Alluard qui rend compte à l'Académie de ce coup de foudre, fait remarquer que tout l'appareil est mis en parfaite communication avec une couche toujours humide et que dans ces conditions le feu Saint-Elme apparaît fréquemment aux parties les plus saillantes du mât, de ses haubans, et de l'échelle de fer : « les moitiés supérieures des hémisphères, dit M. Alluard, sont seules frappées; toutes portent des traces de la fusion qui s'est opérée aussi bien sur les parties rondes que sur les parties angulaires et toujours de la même manière. La matière cuivre ou fer est fondue sur une étendue variable puis soulevée sous forme de cône. On dirait un petit cône volcanique au milieu d'un cratère (fig. 45), tout se passe comme si une force attractive ou extérieure soulevait la substance fondue à la surface des hémisphères. » (1) M. Alluard se demande si ces phénomènes de fusion ne sont pas dus à ce que les métaux sur lesquels ils se produisent communiquent imparfaitement avec la terre ou bien à ce qu'ils sont environnés de tous côtés par des nuées orageuses. Il faudrait peut-être plutôt y voir un effet de foudre en spirale combiné avec le mouvement de rotation de l'anémomètre.

(1) *Comptes rendus de l'Acad. des Sciences pour 1882*, T. II, p. 1199.

M. Zenger décrit les traces laissées par la foudre sur un miroir argenté : « Ce qui est surtout remarquable, dit-il, c'est le nombre des perforations produites dans l'épaisseur du miroir et en particulier la forme des trous qui ressemblent à de petites trombes de verre fondu, dont la forme aurait été conservée par une soudaine solidification. On y distingue une trace hélicoïdale rappelant les trombes de vapeur d'eau produites mécaniquement par la rotation rapide d'un disque circulaire dans les expériences de M. Weyher. » (1)

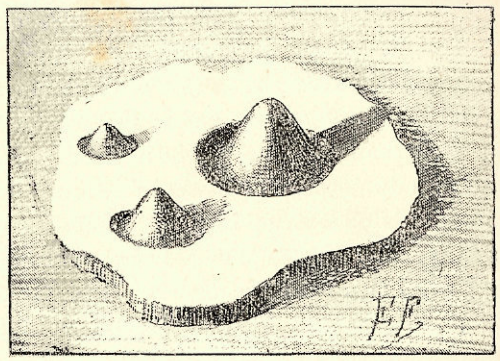

Fig. 45.

2° Effets physiologiques. Ce sont ceux qui doivent le plus attirer notre attention. Quelques auteurs, Kaemtz entre autres, ont voulu voir dans la crainte de la foudre, les exagérations d'esprits timorés ou impressionnables, ils

(1) *Comptes rendus de l'Acad. des Sciences pour 1889*, T. II, (Séance du 19 août).

trouvent cette peur ridicule, imaginaire, et ils affirment que le nombre des victimes de la foudre est si peu considérable qu'il n'y a pas lieu de s'en préoccuper. D'autres au contraire, et nous les croyons plus volontiers, démontrent, chiffres en main, que si les habitants des villes sont rarement atteints, il n'en est pas de même dans les campagnes. Arago rappelle que la moyenne annuelle des cas de mort par la foudre est de 69 en France, 23 en Angletere, 102 en Allemagne; mais c'est dans les campagnes, là où manquent les dérivatifs, que sévissent les plus violents orages, et c'est là, où les occupations extérieures des champs exposent davantage l'homme aux atteintes de la foudre, qu'il faut aller chercher nos exemples et nos observations.

Les blessures causées par le feu électrique peuvent être extérieures ou intérieures : si le fluide parcourt les parties externes du corps, il y laisse un sillon, une brûlure profonde, douloureuse et difficile à guérir ; si le courant pénètre à l'intérieur, en plus de l'action calorifique qu'il exerce encore, il agit sur le système nerveux, le désorganise, et il en résulte une paralysie totale ou partielle, et enfin la mort si l'organe lésé est essentiel.

Dans la mort foudroyante, l'attitude du corps ne change pas. Le Dr Rouyer cite de nombreux cas où ce phénomène s'est produit d'une manière étrange. Le 27 juillet 1691, à Everdon, quatre moissonneurs sont tués par la foudre; l'un tenait une prise de tabac entre ses doigts, un second caressait d'une main son chien qui était sur ses genoux, tandis que de l'autre il lui offrait un morceau de pain, etc. Leurs poses, leurs traits restent les mêmes, la mort les fixe tels qu'elle les a trouvés.

Il nous raconte encore plusieurs faits de même genre : Le procureur du séminaire de Troyes étant à cheval est

frappé par la foudre ; sa monture fit encore deux lieues pour ramener le cadavre de son maître immobilisé sur la selle.

On trouva, après un orage, une chèvre foudroyée qui, dressée sur ses pattes de derrière, tenait à la bouche une branche de verdure.

Le Dr Rouyer croit que la non perception du danger suffit pour faire garder au foudroyé son attitude, tandis que le corps subit une influence morale lorsque la mort n'est pas instantanée (1). Le Dr Brown-Séquard a examiné la question à un point de vue plus général et rappelle que les soldats tués raides d'une balle sur un champ de bataille conservent aussi quelquefois leur attitude. Il conclut des faits observés que 1° la conservation des attitudes de vie et de l'expression faciale après la mort, ne dépend pas de l'apparition subite de ce qu'on appelle la rigidité cadavérique, mais de la production d'un acte vital de rigidité ou contraction tonique pareil au spasme fixe que l'on voit souvent chez les personnes hystériques ou paralytiques ; 2° que nombre de causes de morts, agissant sans qu'il y ait les luttes ordinaires de l'agonie, peuvent produire cet étrange phénomène caractérisé par la persistance, après la cessation de la vie, des attitudes et de l'expression faciale qui existaient au dernier moment du dernier soupir (2).

La mort par la foudre est fréquemment causée par l'imprudence des habitants de la campagne qui, surpris par l'orage et la pluie, se mettent à l'abri sous les arbres. Il est rare, dans ce cas, qu'ils ne soient pas tous atteints, blessés plus ou moins grièvement par la décharge.

Le 4 mai 1877, à Heurdy, près de Boulay, dans le Loi-

(1) *La Nature, 1884*, T. II, p. 57.
(2) *Idem, 1884*, T. I, p. 408.

ret, la foudre tombe sur un orme sous lequel s'était réfugié un individu. Le courant passe des plus hautes branches sur le tronc, suit l'écorce humide, fracasse la tête de l'homme et sillonne la partie de son dos qui touchait à l'arbre.

Le 10 novembre 1883, près de Rambouillet, un orage de grêle force deux cultivateurs à s'abriter près d'un peuplier ; ils sont tués raide et leur crâne est percé de trous circulaires.

Le 22 août 1888, près de Louviers, la foudre frappe trois moissonneurs qui dînaient sous un orme, deux sont tués sur le coup, le troisième, déchiqueté, brûlé par le courant, mourut à l'hôpital après deux jours de souffrances atroces.

On remarque aussi les effets fréquemment mortels de la foudre sur les troupeaux. M. Evrard croit en voir la raison dans la colonne d'air chaud, humide et par suite conducteur, qui s'élève au-dessus des animaux et facilite le passage du courant ; il propose d'y remédier au moyen de paratonnerres mobiles.

Plusieurs accidents se produisent encore lorsque des individus se trouvent en contact avec des corps particulièrement conducteurs : En août 1878, un domestique d'une ferme de l'Est surpris par la pluie, rentrait en tenant une fourche de fer sur son épaule ; tout d'un coup il est jeté à terre, sa fourche lui est arrachée des mains et un coup de tonnerre retentit.

On croit encore, dans certaines campagnes, éloigner la foudre par le son des cloches ; cette erreur superstitieuse a été cause au contraire de bien des désastres et les sonneurs de cloches sont ici particulièrement exposés. En 1718, on avait déjà remarqué que pendant un orage, la foudre tomba entre Landerneau et Saint-Pol-de-Léon, sur 24 églises

où l'on sonnait et qu'elle épargna justement les églises où l'on ne sonnait pas (1). Le 13 juillet 1880, la foudre frappa le clocher de l'église de Broguiés, dans le Tarn, le sonneur était à son poste dans le but de détourner le danger ; le courant suivit la corde rendue conductrice par la pluie et vint tuer le malheureux imprudent (2).

Cependant, si l'homme se trouve en contact avec des corps conducteurs dont la masse est plus considérable et qui communiquent avec le sol, il est au contraire protégé par eux. C'est ainsi que le 4 août 1884 la foudre tombe sur le viaduc en fer de Garabit et blesse les maçons employés aux piles, tandis que les ouvriers qui travaillaient au tablier n'éprouvèrent aucune secousse (3). C'est du reste l'opinion de M. Springer, quand il dit que souvent les constructions métalliques actuelles servent de préservatif (4) ; mais il faut ajouter : à condition que la communication avec le sol soit bien établie.

On pourrait peut-être attribuer à une cause analogue l'immunité complète dont paraissent jouir les trains sur les chemins de fer.

En effet, cette particularité nous semble explicable par la conductibilité en quelque sorte parfaite d'un train en contact avec les rails qui, dans leur trajet presque indéfini, vont toujours aboutir ici ou là à des terrains humides.

M. Évrard résume comme il suit les précautions que l'homme doit prendre pendant les orages pour se garantir de la foudre. Il est dangereux :

1° De se placer sous les arbres ;

(1) *Histoire de l'Acad. des Sciences*, 1718, p. 21,
(2) *La Nature*, 1880, T. II, p 134.
(3) *Idem*, 1884, T. II, p. 216.
(4) *La Lumière électrique* 1886, p. 270.

2° De se trouver en rase campagne si l'on tient à la main des objets de fer, charrue, faulx, etc., et si l'on conduit des animaux ;

3° De se tenir dans un clocher, de toucher la corde de la cloche et encore plus de sonner. L'ébranlement causé par les vibrations des cloches dirige souvent la foudre vers le sonneur; en trente-trois ans, la foudre a frappé en France 386 clochers et tué 103 sonneurs. On doit également éviter d'agiter l'air par des vibrations trop violentes en tirant des coups de feu, en sonnant du cor de chasse, etc.;

4° Il convient naturellement de ne pas s'exposer à un courant d'air et à la pluie, de ne pas ouvrir les portes et les fenêtres d'une maison ;

5° Il faut fuir le voisinage des cheminées, car la suie est un bon conducteur ; s'éloigner des métaux et se dépouiller des objets métalliques que l'on peut avoir sur soi, tels que bagues, chaînes, clefs... (1).

Si, en dépit de ces précautions, la foudre fait des victimes, il ne faut pas, en présence d'une insensibilité complète, s'empresser de croire à toute cessation de vie ; si la décharge n'a pas été directe, le sujet peut être plongé dans un état syncopal prolongé dont il est possible de le tirer par des soins immédiats et intelligents. M. A. Poey, directeur de l'observatoire météorologique de la Havane, qui a constaté ces symptômes chez des foudroyés, indique comme moyen de traitement presque toujours couronné de succès la douche d'eau, aussi froide que possible, glacée si on le peut. Si l'appareil à douches vous fait défaut, ce qui est ordinairement le cas, il faut projeter l'eau sur le corps avec des seaux ou une pompe quelconque.

(1) *La Lumière électrique, 1887*, T. XXII, p. 521.

Ce moyen, indiqué pour les victimes de foudroiement atmosphérique, est déjà connu et adopté avec succès aux Etats-Unis pour les personnes asphyxiées par le passage du courant électrique qui circule dans des fils aériens et donne l'éclairage à la majorité des villes américaines. Le traitement identique pour les deux cas doit souvent durer *une heure* avant de réussir.

Quant aux cas de paralysie totale ou partielle, le professeur Nothnagel de Vienne recommande la métallothérapie qu'il fait ici consister dans l'application longtemps prolongée d'un gros aimant en fer à cheval sur la tête, le dos et les membres.

3° Effets de la foudre sur les arbres. — L'importance de ces effets n'échappe à personne et la nécessité de les bien connaître est évidente, car les arbres peuvent être considérés comme des préservatifs, des paratonnerres naturels, qu'il s'agit seulement de bien disposer afin que leur présence ne se transforme pas en danger; et cela peut arriver, nous l'avons vu, par des imprudences que les paysans renouvellent sans cesse, malgré les terribles exemples dont ils sont souvent témoins.

Les arbres dissipent aussi rapidement l'orage et facilitent l'écoulement du fluide dans le sol ; ils remplissent, on le sait, un rôle préventif en empêchant quelquefois l'électricité atmosphérique d'acquérir un potentiel considérable. Mais en plus de cette fonction importante, dont ils ne s'acquittent qu'à la condition d'être réunis en forêt d'une grande étendue, les arbres isolés sont encore un préservatif. Par leur situation, ils se trouvent exposés aux coups de foudre et sont destinés, pour ainsi dire, à servir de passage au courant ; ils peuvent donc parfois être considérés

comme des paratonnerres par rapport aux maisons avoisinantes. A côté du mal se trouve souvent le remède, et dans les campagnes, où la foudre est à craindre, il est juste qu'on y rencontre les moyens naturels pour s'en garantir.

La foudre ne frappe pas ordinairement les arbres d'un seul trait fulgurant; c'est, d'après M. Colladon, une vaste nappe cylindrique ou conique qui enveloppe la presque totalité du sommet, quelquefois les sommets d'un groupe d'arbres, dans un diamètre qui peut aller jusqu'à 30 *m*. Les vignes sont ainsi souvent foudroyées et une centaine de ceps peuvent être frappés simultanément. Ce fait n'est qu'un exemple de ce que nous avons dit au sujet des ramifications nombreuses de l'éclair lorsque plusieurs points offrent au courant un passage également facile et d'une égale conductibilité; les arbres, les arbustes, avec leurs milliers de pointes dressées verticalement, divisent le courant principal en une multitude de courants dérivés et transforment l'éclair linéaire en éclair arborescent ou en une sorte de nappe conique, suivant l'expression de M. Colladon.

L'effet d'une décharge est bien loin d'être le même sur tous les arbres. Dans une statistique détaillée qui relève les coups de foudre de juillet 1883 en France, nous remarquons que sur 25 coups de foudre notés en quelques jours, on compte 14 arbres foudroyés, dont 8 peupliers, 3 ormeaux, 2 sapins et 1 chêne (1). Ces arbres étaient situés, pour la plupart sur le bord d'un étang, d'une mare, d'un ruisseau. Les peupliers et les ormes étaient écorcés sur presque toute leur longueur, les chênes avaient éclaté,

(1) *Comptes rendus de l'Acad. des Sciences pour 1884*, T. II.

quant aux sapins ils étaient coupés. Ces différents effets dépendent de la conductibilité de chacune de ces essences. Les peupliers et les ormes, dont la sève est abondante, n'éprouvent que peu de détériorations intérieures; leur écorce seule est séchée sur certains points et, par la résistance qu'elle offre, elle est seule atteinte (1). Au contraire, le chêne, dont les fibres présentent des parties sèches, est déchiré plus profondément; mais le bois de sapin est rendu beaucoup plus isolant par des exsudations abondantes de résine et offre une résistance plus considérable au courant dont la force est ainsi naturellement augmentée.

Il faut en outre remarquer, avec M. Werchert, de Bischofsheim (Alsace) que le hêtre et les autres arbres à feuilles rugueuses offrent moins de danger pour les décharges de la foudre que le chêne dont les feuilles sont lisses et comme glacées. Si l'on place des feuilles de hêtre sur une machine électrique à plateau de verre, l'électricité s'échappe en si grande quantité par les innombrables petites pointes de ces feuilles que l'on ne peut arriver qu'à la moitié de la tension obtenue avec des feuilles de chêne.

Ces observations viennent s'appuyer sur les expériences et les études particulières de M. Colladon. Le savant génevois n'est pas d'accord avec la plupart des physiciens, qui donnent pour cause principale et même unique à la projection violente des écorces et des éclats dispersés au loin, la volatilisation subite de l'humidité contenue dans le tronc ou les branches par un effet calorifique de la foudre. Il croit plutôt que cette vaporisation n'est qu'une force con-

(1) *Comptes rendus de l'Acad. des Sciences pour 1880*, T. II, p. 503.

courrante et qu'il faut, dans bien des cas, admettre l'action d'une puissance répulsive électrique (1).

Cela est évident et s'accorde bien avec ce que nous avons dit plus haut. De plus, M. Colladon fait remarquer que les jeunes arbres peuvent être comparés à des tiges métalliques d'égale hauteur pourvues d'un faisceau de pointes multiples et favorisent par leur conductibilité parfaite l'écoulement du fluide : par suite, s'ils sont frappés par la foudre, ils n'en souffriront pas. Les arbres plus âgés, au contraire, qui offrent des parties sèches, sont atteints dans ces parties seulement et il s'ensuit que les feuilles et les menues branches supérieures, c'est-à-dire les parties fraîches de l'arbre, n'offrent aucune résistance au courant et la pluie qui survient pendant l'orage achève de les rendre conductrices.

Les oiseaux ne courent aucun danger lorsqu'ils s'abritent dans le feuillage d'un arbre et l'homme peut être tué par le fluide au pied de ce même arbre dont il touche le tronc; il est frappé là où la résistance fait apparaître les effets terribles de l'électricité naturelle. Ce phénomène, qui paraît singulier, a été contrôlé par M. Duval, propriétaire d'une ferme dans le Berry. Le 18 mai 1879, un peuplier de Caroline, situé près de la maison et sur lequel perchaient une trentaine de pintades était foudroyé; aucun des volatiles ne fut atteint et l'arbre portait cependant des lésions profondes dans la partie inférieure du tronc (2).

Il résulte de toutes ces observations :

1° Que la foudre frappe fréquemment les arbres et surtout les arbres isolés ;

(1) *Mémoires de la Société de Phys. de Genève*, 2e partie, T. XXI, 1872.

(2) *La Nature, 1880*, T. II, p. 322.

2° Qu'elle passe des hautes branches sur le tronc où ses effets apparaissent avec le plus de violence ;

3° Que les peupliers et les ormes sont préférés au chêne et au sapin, mais que les jeunes arbres l'emportent cependant, quelle que soit leur essence ;

4° Que les arbres frappés sont le plus souvent situés près d'une nappe d'eau.

Nous sommes de l'avis de M. Colladon et nous concluons avec lui que des peupliers placés près de maisons isolées constitueront un des meilleurs préservatifs contre la foudre. Mais il faut avoir soin qu'il n'existe pas du côté opposé une mare, un ruisseau, un puits, qui détournerait le courant et le ferait passer de l'arbre à l'eau à travers la maison. L'arbre parafoudre doit donc être à l'ouest ou au sud et avoir ses racines près d'une nappe d'eau quelconque.

Une remarque assez curieuse qu'il est peut-être utile de mentionner, c'est que les arbres foudroyés peuvent agir souvent sur les boussoles à la façon des aimants. M. Larroque attribue ce phénomène aux particules métalliques transportées par la foudre sur ces arbres (1) ; ne doit-on pas plutôt le comparer avec ce fait déjà observé plusieurs fois, à savoir que les corps des foudroyés ont la propriété de causer une commotion comme si l'on touchait une bouteille de Leyde. On pourrait alors supposer avec quelque raison qu'il s'est produit une condensation du fluide animal ou végétal provoquée par le passage du courant.

(1) *Comptes rendus de l'Acad. des Sciences pour 1882*, T. II, p. 420.

CHAPITRE III

PARATONNERRES

Comme on le sait, les premières expériences qui révélèrent la présence de l'électricité dans l'atmosphère furent faites à l'aide de tiges métalliques dressées verticalement et isolées, qu'interrogaient de hardis observateurs désireux d'établir la théorie de la foudre et d'en expliquer les particularités. Ces expériences eurent encore un autre résultat qui devait être le complément des premières découvertes. Après avoir reconnu que l'on avait à redouter les effets centuplés de l'électricité dont on appréciait déjà la puissance, on songea à s'en garantir par ces mêmes moyens qui en avaient dévoilé l'existence. C'était facile : un conducteur reliait au sol cette tige métallique et le paratonnerre était créé.

Cette idée vint à plusieurs physiciens vers la même époque, mais ce fut Franklin qui la mit en pratique : il établit le premier paratonnerre en 1760 sur la maison de John West, marchand drapier à Philadelphie. A peine construit, ce paratonnerre fut frappé par la foudre et reçut

ainsi dans ce nouveau baptême du feu la consécration de son efficacité. Cette admirable innovation a rendu le nom de l'américain à jamais illustre, mais sans vouloir enlever à Franklin son titre de gloire nous devons reconnaître qu'un autre mérite, au moins également, de partager sa célébrité, car les recherches de M. Friess nous ont appris en 1885, que six ans avant Franklin, un moine de Bohême, Prokop Diswisch avait élevé un paratonnerre à pointes multiples dans le jardin de la cure de Prenditz en Moravie. Un mât surmonté d'une tige de fer portait douze bras se terminant chacun par une boîte métallique remplie de limaille de fer, des pointes aiguës se dressaient au-dessus des boîtes et tout l'appareil était réuni au sol par une chaîne.

Ces sortes d'usurpations inconscientes ne sont pas rares et on les retrouve, comme partout, dans l'histoire des inventions. C'est ainsi qu'il faut apprendre le nom de Von Kleist, évêque de Poméranie avant celui de Muschenbroek qui a pourtant eu l'honneur de nommer la bouteille de Leyde; de même on doit reporter sur Jean Alexandre une partie de l'admiration que l'on accorde à Samuel Morse pour l'invention de la télégraphie etc.. Et souvent ainsi un principe, un fait a été découvert plusieurs fois, surtout alors que chaque groupe d'individus, chaque ville, et à plus forte raison chaque pays et chaque continent, était isolé et n'entrait en communication avec ses voisins qu'à de trop rares intervalles pour leur annoncer l'invention nouvelle. La renommée réservait ses accents pour redire à tous les conquêtes, les faits de guerre, et la science n'avait pour adeptes qu'un petit nombre d'esprits dont le caractère exceptionnel les portait d'autant moins à se mettre en rapports avec leurs semblables.

Il n'en est plus de même aujourd'hui; les moindres découvertes scientifiques sont répétées mille fois à l'univers entier et des recherches historiques habilement dirigées réparent peu à peu les injustices involontaires commises par le passé. Cependant, ces recherches quelquefois poussées jusqu'à l'extrême veulent nous faire voir dans certaines coïncidences purement fortuites l'application d'inventions qu'il est difficile de faire remonter aussi loin. Ainsi il nous paraît audacieux d'affirmer que le temple de Salomon était muni de paratonnerres. Le Dr Michaëlis de Gœttingue, Lichtenberg et d'autres savants ont discuté la question en s'appuyant sur ce que le temple n'avait jamais été frappé par la foudre, les uns ont analysé les descriptions de l'historien Josèphe, les autres ont tiré leurs conclusions des travaux de reconstitution de M. de Rougé. On est évidemment certain que le temple, revêtu de bois de cèdre doré était garni sur toutes ses arêtes de plaques d'or et surmonté de nombreuses pointes métalliques également dorées; des tuyaux de bronze déversaient l'eau des toits dans les citernes, et cet ensemble constituait en réalité un système complet de protection contre la foudre, là où les constructeurs n'avaient vu qu'un mode d'ornementation. En tout cas on peut être sûr que cette invention, si elle a été faite, n'a pas été léguée aux siècles suivants, sans quoi on ne verrait pas plusieurs auteurs latins ou grecs nous proposer divers procédés plus ou moins bizarres pour se préserver de la foudre.

Columelle, au 1er siècle, nous dit que Tarchon, afin de protéger sa maison contre les foudres de Jupiter l'entourait de vignes blanches. Pline ne croit pas à la vertu de la vigne mais il recommande le laurier; il assure encore que des peaux de phoque étendues sur les maisons les garan-

tissent parfaitement, car le phoque, animal privilégié, dit-il, n'a jamais été foudroyé. (1)

Les soldats de Charlemagne plantaient en terre des perches ornées de papier et croyaient à leur vertu préservatrice. Au x^e siècle, le pape Sylvestre II, plus connu dans les sciences sous le nom de Gerbert, propose un moyen analogue : il recommande l'usage des bâtons armés de fer de lance.

Quelqu'étranges que semblent d'abord certains de ces moyens employés par les anciens pour écarter le foudre, nous devons remarquer que plusieurs étaient basés sur l'influence que les plantes exercent sur la direction d'un courant, comme nous l'avons dit précédemment, nous voyons aussi apparaître, dans les lances de Gerbert, une sorte de commencement de la théorie du pouvoir des pointes.

De nos jours, n'a-t-on pas voulu suppléer à l'action jugée insuffisante des paratonnerres et construire une cage de verre pour y trouver un abri complet contre la foudre. Mais, comme dit Arago, on ne doit pas s'y croire en parfaite sûreté car le grand coup de foudre qui atteignit le palais Minuzzi dans le territoire de Ceneda le 15 juin 1776 perça et brisa 800 carreaux de vitre (2) ; le D^r Sestier rappelle de même que le 8 juin 1747 la foudre globulaire brisa tous les carreaux de l'église des Grands-Augustins (3); etc... Une cave bien fermée serait peut-être le meilleur asile, et cependant la sécurité ne serait pas encore absolue.

Le paratonnerre de Franklin fut établi en Angleterre, à Payneshall en 1762; de là il passa à Hambourg en 1769, puis en Bavière en 1776. La république de Venise l'adopta

(1) *Hist. Nat. liv. II. cap. LVI.* Pline.
(2) *Œuvres Complètes.* Arago. T. IV. p. 285.
(3) *De la foudre.* Sesher. T1. p. 309.

deux ans après pour sa flotte et ce ne fut qu'en 1783, après avoir fait le tour du monde, qu'il commença d'être accepté en France. Et encore sa réputation ne lui fut acquise qu'à la suite d'un procès soutenu et perdu par la municipalité de St-Omer contre M. de Boisvallée qui avait installé la tige préservatrice sur sa maison en dépit de la foule ameutée par une ignorante superstition : de Robespierre se fit l'avocat du paratonnerre.

Bien que le paratonnerre ait subi quelques légères modifications dans sa construction, on peut dire en réalité qu'il est resté le même, et, comme celui de 1760, le paratonnerre d'aujourd'hui se compose uniquement d'une pointe et d'un conducteur qui communique avec le sol; ce sont les détails qui ont varié et les divers perfectionnements apportés dans sa construction ont été réglementés officiellement.

Dès 1784, une commission dont faisaient partie Coulomb, Laplace et Franklin lui-même, fut nommée en France pour donner les instructions nécessaires à l'établissement des paratonnerres. Après les nouvelles ordonnances de 1799 et de 1807 vient le rapport de 1823 rédigé par Gay Lussac au nom de l'Académie des Sciences sur la demande du Ministre de l'Intérieur et dont les prescriptions sont encore suivies en grande partie aujourd'hui. Lors de la construction du Palais de l'Industrie, en 1854, un complément d'instruction fut donné par Pouillet qui rédigea aussi la circulaire de 1867. Une nouvelle commission, composée de Fizeau, Becquerel, du Moncel, Ste-Claire Deville, etc... ajoute encore en 1875 de nouveaux détails, et en 1886, MM. Mascart, Becquerel et Berger indiquent les mesures spéciales à prendre pour protéger la tour Eiffel. Nous allons voir les modifications qu'on apporta successivement ainsi, soit dans

la tige, soit dans les conducteurs ou dans la communication avec le sol.

I. Tige

La tige des premiers paratonnerres était en fer doré et mesurait 9 mètres de long; mais en présence de l'oxydation rapide qui désagrégeait la pointe, l'ordonnance de 1823 prescrivit l'emploi de tiges composées de trois pièces : une barre de fer de 8 *m.* surmontée d'une baguette de laiton doré et d'une aiguille de platine de 0,05 *m.* Ces différentes parties étaient soudées l'une à l'autre (fig. 46). Mais à cette pointe de platine, Pouillet substitua une baguette de cuivre à pointe non effilée, elle s'échauffait moins par suite d'une meilleure conductibilité, de plus la dépense était moins grande.

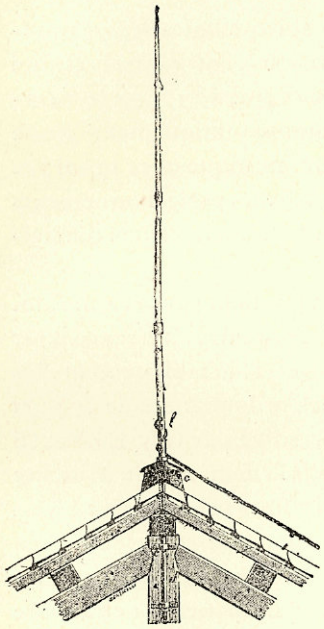

Fig. 46.

Au contraire, M. A. Trioche insiste beaucoup sur la nécessité d'employer des pointes aiguës afin d'augmenter la portée de l'action préventive (1). Il rappelle que, suivant Puchot, l'étincelle est

(1) *Rev. Int. de l'Élect.*, T. IV, p. 456.

moins intense sur une pointe que sur une surface arrondie et qu'il conviendrait donc, alors même qu'on ne voudrait voir dans le paratonnerre qu'un instrument destiné à recevoir des coups de foudre, d'adopter la terminaison en pointe et non la terminaison obtuse, puisque les coups qui atteindraient le paratonnerre seront moins intenses (1).

Cela est évident, mais il convient aussi de remarquer que, soit dans le cas d'un écoulement silencieux sous la forme de feu St-Elme, soit dans le cas d'une décharge bruyante, il arrive bien souvent que la pointe aiguë éprouve un commencement de fusion et se changera bien vite en un bouton métallique. C'est pourquoi Pouillet a eu raison de préférer des pointes peu effilées car, d'après la loi de Joule, la quantité de calories développée dans un conducteur est inversement proportionnelle à la section de ce conducteur.

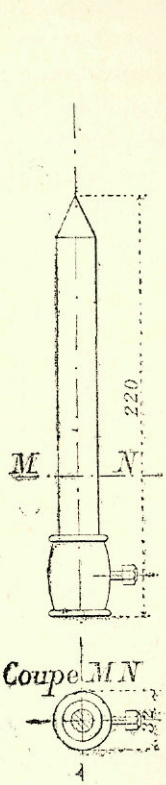

Fig. 47.

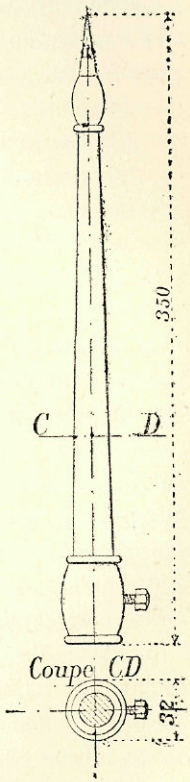

Fig. 48.

D'après le Dr Léonhard Weber, la tige devrait être com-

(1) *Annales de Chim. et de Phys.* T. XXVI, p. 316.

plètement en fer galvanisé; enfin on a proposé à Dresde, en 1886, des tiges de nickel. En tout cas, la tige des paratonnerres doit être taillée en pointe et suffisamment solide pour résister aux violentes tempêtes.

Cependant, les règles des commissions ne sont pas suivies exactement par tous les architectes, loin de là. La question est toujours discutée et l'embarras est souvent grand; chaque inventeur prône son système et prouve que les tiges des meilleurs paratonnerres doivent être en cuivre, disent les uns, en fer, selon les autres; tantôt à pointe acérée, tantôt à pointe obtuse (fig. 47), ou bien encore à olive surmontée d'une aiguille (fig. 48).

La longueur de la tige, comme sa matière et sa pointe, est un nouveau sujet de discussion. Tel la veut de 6 à 9 *m.* pour qu'elle ait une action plus étendue; une longueur de 3,50 *m.* est au contraire, pour d'autres, un maximum que l'on ne doit pas dépasser, car ils assurent que les tiges de 9 *m.* sont trop lourdes, elles pèsent souvent 120 et 150 *kilog.*, leur installation présente des difficultés; elles chargent le poinçon sur lequel elles sont placées, enfin cela oblige à renforcer et à consolider le faîtage des toits.

M. Jarriant a diminué ce poids et a construit une tige de paratonnerre qui ne pèse que 20 *kilog.* en employant quatre cornières de fer disposées de façon à constituer une pyramide triangulaire; ces cornières sont soutenues de distance en distance par des pièces carrées sur lesquelles elles sont vissées. Leur prix est de beaucoup inférieur à celui des tiges pleines (1).

En 1880, M. Buchin a établi aussi au Pic du Midi des tiges en fer creux (2); la pointe est de cuivre rouge à arêtes

(1) *Comptes rendus de l'Acad. des Sciences pour 1877*. T. I, p. 217
(2) *Rev. Int. de l'Élect.*. T. IV. p. 463.

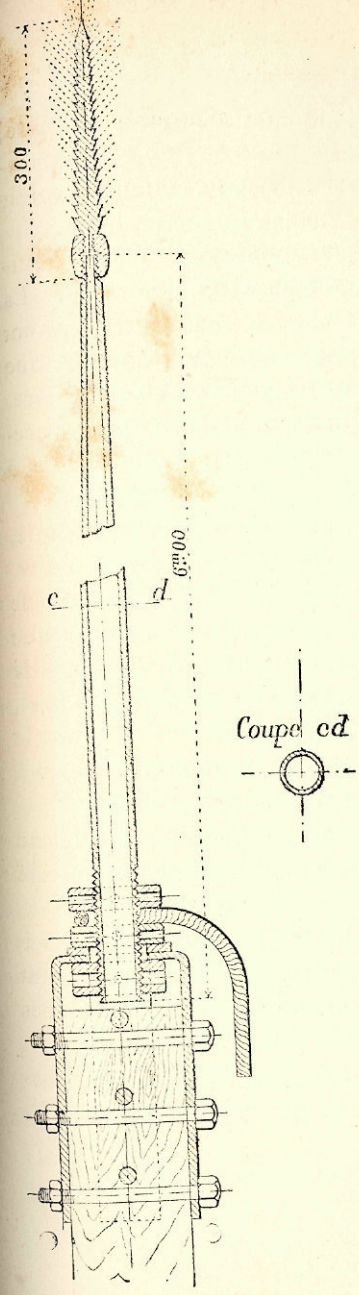

Fig. 40.

multiples, ce qui peut augmenter dans une certaine mesure l'action de la pointe principale (fig. 49). Une tige de 6 *m.* avec ses écrous ne pèse que 35 *kilog.* et ce système présente en outre, par suite de sa flexibilité, l'avantage d'une résistance plus grande qu'une tige pleine à section égale (1).

Un ingénieur allemand a aussi proposé de faire des pointes en charbon de cornue. Il remplissait d'abord les pores du charbon avec du bichromate de potasse et de la gélatine, mais l'usage dévoila les inconvénients de ce procédé : une gelée survenant brusquement avait écaillé la pointe en plusieurs endroits. On y remédia facilement en employant le procédé Ebert qui consiste à remplir de métal par la galvanoplastie tous les pores du charbon. On a donc fabriqué des tiges de char-

(1) *Résistance des matériaux*, T. I. p. 270. Morin,

bon ainsi platinées, dorées, argentées, cuivrées ou nickelées (1).

L'Electrical Supply C° de Chicago a entrepris en 1890 la construction d'un nouveau paratonnerre inventé par M. Virt pour protéger ses établissements.

Sur un boulon vertical sont embrochés une vingtaine de disques métalliques séparés par des rondelles très minces de mica. Le boulon communique avec le disque supérieur mais est isolé des autres par un épais manchon de caoutchouc. Le tout est renfermé dans une boîte cylindrique en tôle et peut être placé en plein air sans inconvénient. Si une décharge atmosphérique atteint le conducteur, elle passe dans le boulon qui lui est relié et dans le disque du dessus. De celui-ci, elle passe de disque en disque jusqu'à la base métallique de l'appareil d'où un fil la conduit à la terre. Le danger de la formation d'un arc au moment de la décharge et de sa continuation par le courant est évité grâce au refroidissement que détermine la masse relativement considérable des disques métalliques.

La commission de 1868 s'est attachée surtout à régler le nombre et la distribution des tiges principales et des tiges secondaires. Elle recommande de placer des tiges principales de 8 *m.* sur tous les points culminants des faîtages: pavillons, dômes, campaniles..., les tiges secondaires de 3,50 *m.* doivent être posées à 25 ou 30 *m.* les unes des autres, s'il y a des saillies nombreuses, telles que cheminées, ornements... ou à 60 *m.* s'il n'y a aucune saillie.

(1) *Elektrotechniker*, 1889, et *Rev. Int. de l'Élect.*, T. IX, p. 27.

II. Conducteurs

Les conducteurs doivent être intimement liés avec les tiges, quelles qu'elles soient, par une pièce appelée *collier de prise du courant* et qui embrasse la forme exacte de la tige : une soudure complète le contact. Les diverses parties d'un conducteur de fer à section carrée de 0,015 à 0,020 *m.* de côté étaient primitivement réunies par des boulons à vis ; l'instruction de 1854 recommande de les joindre par des bourrelets de soudure à l'étain afin de rendre la communication plus parfaite. Pouillet conseillait, en plus, de diminuer autant que possible le nombre des joints d'un conducteur. Si l'on emploie un câble de fer, il doit se composer de 4 torons de 15 fils galvanisés ayant chacun 0.002 *m.* de diamètre, et être goudronné; quant aux câbles de cuivre ils sont à 10 fils ou à 19 fils si la ligne n'est pas bifurquée. Mais, Pouillet défend absolument l'emploi des chaînes, en faisant justement remarquer qu'il ne peut y avoir aucune garantie dans le contact des deux anneaux.

Selon M. F. Michel, l'emploi des câbles de cuivre est également dangereux, sans parler de la valeur intrinsèque du métal qui peut tenter la cupidité des ouvriers, car on a vu des vols de ce genre. (1) Sous l'action des courants continuels qui traversent les conducteurs d'un paratonnerre, les fils deviennent aigres et cassants et souvent ils se rompent presque tous, car les effets électriques sont encore augmentés des vibrations occasionnées par le vent ; de sorte qu'au bout de peu de temps, ce conducteur présente

(1) *Comptes rendus de l'Acad. des Sciences* pour 1874, T. I, p. 1332.

une section tout à fait insuffisante pour résister à des décharges un peu intenses. M. F. Michel déclare, en conséquence, qu'il faut préférer des tringles de fer assemblées et soudées, ou bien encore des fils de fer de fort diamètre, d'un seul bout, afin d'éviter les raccords toujours défectueux et en nombre suffisant pour donner au conducteur une section de 0,00.0350 à 0,00.0450 *m. car.*

Malgré cela G. Planté fait aussi remarquer avec juste raison, d'après des expériences, que les décharges subies par les conducteurs en fer du paratonnerre ou même seulement l'écoulement silencieux et prolongé du fluide suffit pour rendre ces conducteurs cassants et fragiles sans qu'il soit possible de constater une interruption appréciable avec les instruments électriques : « Ainsi, ajoute-t-il, s'expliquent les accidents arrivés quelquefois avec des paratonnerres en apparence irréprochables » (1). M. Callaud conclut de même (2). C'est pourquoi il est nécessaire de renouveler souvent et complètement les conducteurs des paratonnerres, alors même qu'ils semblent offrir une conductibilité suffisante, s'ils se sont trouvés exposés à de fréquents et violents orages.

Si les tiges sont nombreuses, comme cela arrive sur les grands édifices où il faut protéger tous les points saillants, il est évident que ces tiges sont reliées et soudées à des conducteurs bifurqués qui rejoignent les conducteurs principaux.

Enfin les instructions prescrivent toutes de relier les pièces métalliques importantes d'un bâtiment avec le conducteur. On comprend facilement la nécessité de cette mesure car il faut que le bâtiment protégé forme un tout com-

(1) *Recherches sur l'électricité*, G. Planté, p. 299.
(2) *Traités des Paratonnerres*. Callaud, p. 91.

plet bon conducteur de manière à ce que des étincelles d'induction ne viennent pas à éclater entre les interruptions des pièces métalliques. Toutes ces jointures, tous ces raccords doivent donc être soigneusement faits et souvent vérifiés. Mieux vaudrait n'avoir pas de paratonnerre que d'en avoir un mal établi, et il suffit qu'une seule de ces jointures soit négligemment faite ou qu'une seule soit oubliée pour que des étincelles en jaillissent, et on sait les résultats désastreux qui en résultent :

Pendant un violent orage qui éclata à la Guadeloupe, au camp Jacob le 11 septembre 1882, on constatait que la foudre avait crevé, dans la galerie d'un bâtiment de l'hôpital, une voûte de briques et projeté au loin des débris de béton, de briques, et de carreaux ; dans le rapport que le ministre de la marine adressa à ce sujet à l'Académie des Sciences, le 8 janvier 1883, nous relevons le passage suivant : « Il semblait extraordinaire que la foudre eût marqué ainsi son passage sur un bâtiment protégé par un paratonnerre en bon état qui n'avait éprouvé aucune avarie et dont le conducteur était sur l'autre face du bâtiment, tandis qu'à quelques pas du même point se trouvaient des arbres qui n'avaient pas souffert. Mais en examinant les lieux on remarqua que le passage de la foudre s'expliquait par une interruption de communication entre deux parties métalliques : l'une, la balustrade de la galerie, l'autre. un tuyau coudé en fonte amenant l'eau dans la salle des douches et situé dans un plan passant par le trou constaté dans la voûte » (1).

Le 29 juillet 1888, un incendie se déclarait à l'Hôtel-de-Ville de Bruxelles, sous l'effet d'un coup de foudre qui avait

(1) *Comptes rendus de l'Acad. des Sciences*, pour 1883, T. I, p. 109.

frappé le paratonnerre. Un enquête prouva que le feu avait été allumé par une étincelle d'induction qui avait jailli entre une pièce de fer située sous la toiture et un des conducteurs du paratonnerre placé en dessous à une courte distance de cette pièce. Cette étincelle enflamma les boiseries de la toiture (1).

M. Grenet propose un nouveau conducteur qu'il adapte à de petites tiges, et qu'il emploie depuis 1872 (2). Ce conducteur consiste en lames ou rubans de cuivre rouge, métal recommandé par l'Académie des Sciences et prescrit par la circulaire ministérielle du 23 mai 1877, pour la protection des édifices militaires et des magasins à poudre. Les commissions municipales ont objecté à ce système les vols qui peuvent se produire, et dont nous avons déjà parlé précédemment. M. Grenet y répond en faisant remarquer que son ruban conducteur, presque sans épaisseur, s'applique avec adhérence à la surface des murs, qu'il fait, pour ainsi dire, corps avec eux et que par suite il est insaisissable; il peut être étamé, plombé ou peint, et se trouve ainsi confondu avec les autres matériaux. Enfin, ce ruban ne peut servir d'échelle aux malfaiteurs pour entrer dans l'édifice ou encore pour s'en échapper, comme cela s'est déjà produit dans certaines prisons. D'après l'inventeur, on réalisera, avec ce paratonnerre, des économies considérables, car les frais d'installation sont près de dix fois moindres.

Un système analogue est employé à bord des navires. Autrefois un hauban métallique faisait communiquer la tige dressée en tête du grand mât à une chaîne que l'on jetait à la mer lorsque le temps était orageux. Mais on

(1) *Revue Int. de l'Elect.* T. VII. p. 234.
(2) *Comptes rendus de l'Acad. des Sciences* pour 1886, T. II.

oubliait souvent, au moment opportun, de mettre le paratonnerre en communication avec l'eau ; en outre les chaînes, on le sait, ne sont pas des conducteurs certains, et de plus, étant donné la dimension des navires, une seule tige et un seul conducteur ne suffisaient pas. En 1813 lord Napier demandait déjà à l'Amirauté de Londres un paratonnerre à chaque mât, puis en 1842, on adopta en Angleterre le système proposé par Harris, qui fut reconnu comme le meilleur. Des lames de cuivre courent le long de rigoles creusées dans le bois des mâts, transformés ainsi en conducteurs. Ces lames de cuivre pénètrent avec le mât dans l'intérieur du navire et traversent la quille pour aller se mettre en contact avec la doublure métallique extérieure. La communication est ainsi parfaite. Notre marine est pourvue de ces paratonnerres depuis quelques années.

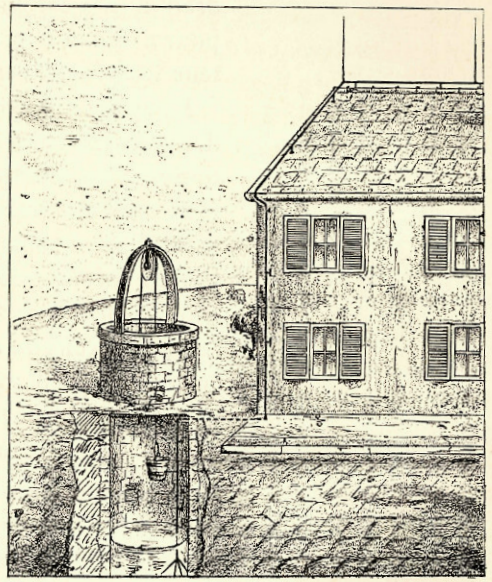

Fig. 50.

III. Communication avec le sol.

La communication des conducteurs n'est pas aussi facile à obtenir sur terre que sur mer, et cependant il est indispensable qu'elle soit parfaite pour la sécurité de l'édifice à protéger; si cette condition faisait malheureusement défaut, cela rendrait nulles les précautions prises pour avoir une tige et un conducteur irréprochables.

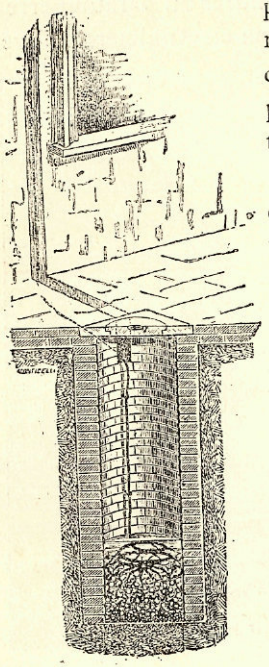

Fig. 51.

Le conducteur doit aller se perdre dans un puits spécial qui aura toujours un mètre d'eau pendant les plus grandes sécheresses (fig. 50); mais, auparavant, pour éviter que la terre ne l'oxyde par son humidité, il devra traverser un conduit rempli de coke ou de braise de boulanger, ce qui le maintiendra intact et augmentera sa conductibilité. Une autre branche bifurquera avec la tige principale et ira se perdre dans un terrain humide par plusieurs pointes plongées dans un auget rempli de coke (fig. 51). Enfin si des conduites d'eau ou de gaz se trouvent à proximité elles doivent aussi être reliées aux conducteurs; car d'après Tœpler, le courant peut dériver du paratonnerre sur des corps présentant une surface plus grande, tels que les tuyaux d'eau ou de gaz, et pour y arriver il traversera les milieux interposés.

Le raccordement des paratonnerres aux conduites de gaz et d'eau est sans cesse discuté par les gaziers et hydrauliciens d'une part et les ingénieurs électriciens de l'autre; ces derniers le réclament et les premiers le refusent souvent en faisant intervenir des questions de droit et de propriété qu'ils semblent mettre au-dessus de la sécurité générale. Le professeur Neesen a présenté le 27 mai 1890 à la Société électrotechnique de Berlin un rapport dans lequel il a su accumuler de tels arguments en faveur du raccordement qu'il n'est plus guère possible de soutenir une thèse contraire.

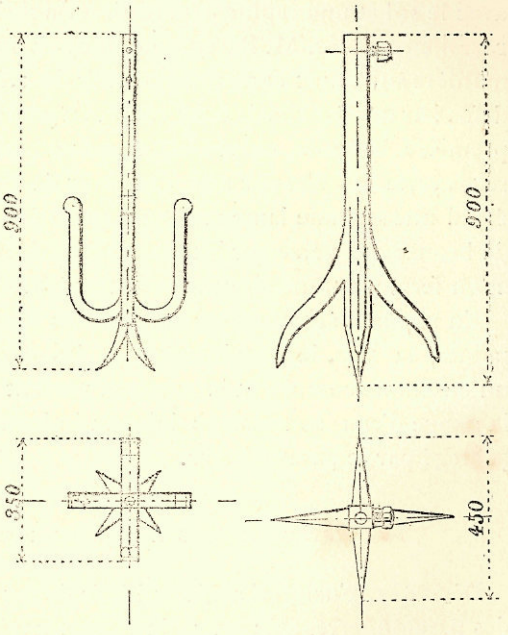

Fig. 52.

Les contacts avec le sol qui doivent être aussi larges que possible affectent diverses formes. Perrot et Callaud ont construit un appareil à trois tiges aiguës, sorte de crampon ou grappin qui semble remplir les conditions exigées (fig. 52). En Italie, une ordonnance du ministre de la guerre prescrit de relier les conducteurs inférieurs à une lame de plomb d'un mètre de surface ou bien à une corbeille cylindrique formée de barres de

INSTITUTO DE FÍSICA DA U.F.R.J. BIBLIOTECA

fer étamées de 1,80 *m.* de haut, remplie de coke. Dans la *Revista di Artigliera e Genio*, M. Baretta propose un nouveau *perd-fluide* : il consiste en une lame de cuivre ou de fer ondulé, roulée en un cylindre de 0,80 *m.* de hauteur. Toutes ces ondulations sont munies à l'extérieur et à l'intérieur de pointes coniques en cuivre espacées entre elles de 0,10 *m.*; les bords libres de ces lames sont taillés en dents de scie. On atteindrait ainsi une large surface de contact avec le sol et une rapide déperdition du fluide. Si le sol est rocailleux et sec, M. Baretta modifie son installation de la manière suivante : dans une tranchée de 1,50 *m.* de profondeur, sur une couche de coke réduit en petits morceaux, une première lame de cuivre est étendue horizontalement et recouverte de coke sur une épaisseur de 0,25 *m.* puis on étend une seconde lame reliée à la première par des attaches de bronze, on verse sur le tout une troisième couche de coke et on ferme la tranchée avec de la terre fortement damée (1).

En résumé, si toutes ces précautions sont bien prises, la pointe, la tige, les conducteurs et les contacts formeront un ensemble complet et le courant passant de la pointe à la nappe d'eau souterraine laissera indemne le bâtiment protégé par le paratonnerre.

IV. Paratonnerres à Pointes multiples

Dès 1832, Fusinieri avait eu l'idée de multiplier les tiges des paratonnerres (2); en 1862 Perrot avait établi son parafoudre qui était, on le sait, à plusieurs pointes, et nous avons vu que le premier paratonnerre de 1754 était à pointes multiples. Ces essais ont été abandonnés ou sont restés simplement à l'état de théorie; Melsens a su les mettre en pratique en y ajoutant les perfectionnements nécessaires.

(1) *Rev. Int. de l'Elect.* T. VII, p. 233.

(2) *Le Paratonnerre Melsens*, Nardi, p. 86 et *Comptes rendus de l'Acad. des Sciences pour 1881*, T. II, p. 693.

Le paratonnerre Melsens est multiple dans ses tiges, (fig. 53) dans ses conducteurs et dans ses contacts avec la terre (1). Ses pointes réunies en faisceau sont de toutes grandeurs, celles du centre, plus grandes, sont en fer doré; les petites sont en cuivre rouge et toutes sont effilées. Ces faisceaux sont à leur tour très nombreux, si l'édifice est considérable et des conducteurs à fil simple courent de tous côtés et vont aboutir à la terre par vingt voies différentes. Le bâtiment est enveloppé dans une sorte de cage métallique.

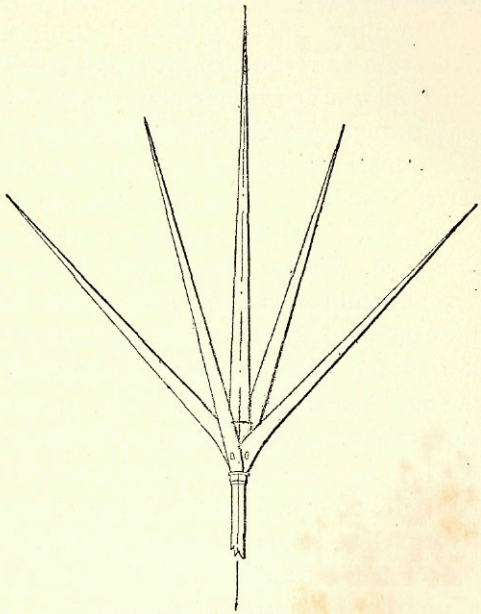

Fig. 53.

Melsens démontre à ses adversaires qui lui faisaient craindre la production d'étincelles entre ces conducteurs, que ce système constitue au contraire une protection complète : « Un animal quelconque, dit-il, lapin, oiseau, poisson... est

(1) *Des paratonnerres à pointes, à conducteurs et à raccordements terrestres multiples*, Bruxelles, 1877.

placé dans une sphère creuse à mailles métalliques plus ou moins serrées mise sur l'armature d'une forte batterie de Leyde ou suspendu au-dessus des armatures. On essaye de foudroyer l'animal mais il ne paraît éprouver aucune action d'une étincelle qui lui donnerait une commotion dangereuse ou même mortelle s'il n'était protégé par la cage métallique » (1).

D'un autre côté Du Moncel et plusieurs autres physiciens, tout en reconnaissant la véracité de cette affirmation, pensaient que ce système devait être très onéreux (2). Melsens prouve que le prix en est moins élevé que celui des paratonnerres à tige unique. Etant donné que les paratonnerres installés sur les abattoirs de la Villette ont coûté 70.000 fr., il calcule que le sien serait revenu à moins de 20.000 (3). D'autre part, d'après les devis établis pour un certain nombre de travaux effectués en Belgique, il montre que les frais d'établissement ont diminué dans les rapports de 1 à 6 3/4 et même de 1 à 9 1/4 : « Il en résulte, dit-il, que des économies de 75.163 fr. et même de 81.268 fr. peuvent être réalisées sur une dépense totale de 90.833 fr. » (4).

Installé pour la première fois sur le nouvel hôtel de ville de Bruxelles, le paratonnerre Melsens a protégé successivement dans cette même ville l'Hôpital St-Pierre, la Bourse et une foule d'autres monuments belges. En France, il n'est pas employé pour les édifices publics qui sont toujours surmontés des paratonnerres officiels à longue tige unique. M. Fabre d'Alais a cependant établi en 1878 le

(1) *Comptes rendus de l'Acad. des Sciences pour 1882*, T. II, p. 128.
(2) *Application de l'Électricité*, Du Moncel, T. V. p. 641.
(3) *Comptes rendus de l'Acad. des Sciences pour 1878*, T. I, p. 1328.
(4) *Comptes rendus de l'Acad. des Sciences pour 1881*, T. I, p. 536.

paratonnerre Melsens sur la maison de sûreté à Nîmes qui n'en était pas encore pourvue, dans la crainte que les conducteurs à forte section ne viennent servir de moyens d'évasion; avec les fils multiples de Melsens, cette crainte disparaissait (1). Enfin des aigrettes ont été disposées aux angles de la troisième plate-forme de la tour Eiffel par ordre de la commission de 1886 et une large communication avec la couche aquifère a transformé la tour elle-même en un gigantesque paratonnerre (2).

Les prises de terre destinées à assurer la liaison avec le sol sont au nombre de huit, par groupe de deux. Pour les piliers nord et sud, des tubes en fonte de 0,020 *m.* de diamètre s'enfoncent verticalement à 12 *m.* environ au-dessous de la surface du sol; aux deux autres piles, est et ouest, ce sont de gros tubes de 0,050 *m.* de diamètre qui descendent d'abord verticalement, puis se recourbent à angle droit sur une longueur moyenne de 18 mètres : ils sont enfouis dans les alluvions de la Seine.

Tous les perd-fluides, les prises de terre, etc., ont été vérifiés avec soin par une suite d'expériences contradictoires (3) et le coup de foudre qui frappa le paratonnerre central le 19 août 1889 a démontré que la communication de la tour au sol est parfaite et que la sécurité dans l'édifice est absolue (4).

Aucune des personnes qui se trouvaient dans la tour n'a rien ressenti et cependant des fragments du paratonnerre central ont été volatilisés sous l'action calorifique de la

(1) *La Nature*, 1879, T. I. p. 398.
(2) *Rev. Int. de l'Élec. 1886*, p. 95.
(3) *Comptes rendus de l'Acad. des Sciences pour 1889*. T. II, (Séance du 2 décembre 1889.)
(4) *Comptes rendus de l'Acad. des Sciences pour 1889*, T. II, (Séance du 26 août 1889.)

foudre tandis que des fusées lumineuses accompagnées d'un crépitement intense s'apercevaient aux pointes des paratonnerres de la plate-forme.

V. Action des paratonnerres

Un paratonnerre exerce deux actions que certains auteurs ont appelées l'une préventive, l'autre préservatrice. Par la première de ces influences, un paratonnerre empêche d'abord quelquefois le potentiel atmosphérique de s'élever suffisamment pour accumuler dans le sol, au-dessous du nuage orageux, une charge électrique de signe contraire capable d'amener une décharge. Cette action s'exerce évidemment en temps ordinaire presque constamment, alors que par la moindre condensation des vapeurs, un nuage électrisé positivement vient à déterminer dans le sol la formation momentanée d'une faible quantité d'électricité négative; le paratonnerre facilite, dans ce cas, l'écoulement du fluide et un courant s'établit de la pointe au sol. Dès que cette charge d'électricité négative est dissipée, l'électricité positive qui s'échappe du sol, nous le savons, par voie d'émission, reprend sa marche ascendante vers l'atmosphère par l'intermédiaire des corps conducteurs et principalement par les arbres et les paratonnerres.

Les conducteurs métalliques possèdent encore une propriété préventive lorsqu'un nuage orageux à potentiel élevé est à une distance trop grande pour donner lieu à une reconstitution brusque; dans ce cas, un courant s'établit encore par le paratonnerre, mais cette fois plus intense, et le flux électrique peut apparaître à la pointe sous la forme d'une aigrette lumineuse; ce phénomène se présente surtout au commencement ou à la fin d'un orage. Enfin cette influence complète l'action de la décharge mais le plus souvent elle ne peut l'empêcher, car il ne faut pas croire que l'influence des paratonnerres sur les nuages orageux soit toute puissante.

Mann, président de la société météorologique de Londres, en exagère certainement l'importance : « Quand un grand nombre de paratonnerres, dit-il, sont placés les uns près des autres, comme cela arrive pour la protection des bâtiments d'une ville étendue, il n'y a pas de doute, s'ils se terminent en pointe, qu'ils ne servent à saturer le nuage qui s'en approche et ne le privent de son aiguillon avant qu'il ne soit arrivé à une distance explosible. Après que la cité de Pietermaritzburg, dans le Natal, eût été abondamment pourvue de paratonnerres, la décharge effective de violents coups de foudre dans le rayon de la ville devint presque inconnue » (1).

M. Hirn est même persuadé qu'un paratonnerre bien établi ne peut être frappé par une décharge fulgurante (2).

Il n'en est pas de même du professeur Naccari qui ne croit pas à une action préventive bien étendue quand il dit :

« On a reproché à M. Lodge de n'avoir pas fait usage de pointes et de s'être placé là dans des conditions différentes de celles du paratonnerre. Mais ce dernier, on le sait, ne prévient la décharge que si sa pointe peut influencer le nuage pendant que ce dernier se charge. Chaque fois que le nuage sur lequel le paratonnerre doit agir acquiert un haut potentiel à l'improviste, l'action préventive de

(1) *Journal of Society of Arts*, Friday, April 30, 1875, p. 528.
(2) *Comptes rendus de l'Acad. des Sciences* pour 1882, T. II, p. 757.

l'appareil ne s'exerce plus; bien plus, sa présence facilite le coup de foudre » (1).

Dans les villes, par leur grand nombre, les paratonnerres et les pointes conductrices de toutes sortes peuvent jusqu'à un certain point neutraliser l'action des nuages orageux et diminuer le nombre des décharges foudroyantes, mais cette action préventive n'est pas et ne peut être complète. Si la tension électrique d'un nuage est très forte, elle développe dans le sol une charge considérable d'électricité de signe contraire et un commencement d'écoulement se fait évidemment par le paratonnerre, mais il s'achève forcément par une décharge disruptive. Par suite, le rôle principal d'un paratonnerre n'est pas d'annuler la puissance électrique d'un orage mais bien simplement de protéger l'édifice qu'il surmonte contre les décharges foudroyantes.

Faut-il de plus considérer les tiges métalliques comme des excitateurs capables de modifier sensiblement la direction du courant? D'après Snow Harris, les paratonnerres n'attirent pas la foudre, ils ont un rôle passif; le conducteur est le patient et non l'agent du phénomène et ils n'ont pas plus mission d'attirer ou d'inviter la décharge de la foudre qu'un fleuve d'attirer l'eau qu'il charrie. C'est là une idée bien subtile car l'eau d'un fleuve passera toujours dans le lit déjà creusé. La commission de 1867 répond en quelque sorte à cette question quand elle dit : « Les deux points de départ de l'éclair sont, l'un sur le nuage, l'autre sur la nappe souterraine qui est le deuxième nuage nécessaire à l'explosion de la foudre. C'est ainsi que la terre, sans cesser d'être à l'état naturel dans son ensemble, se trouve éventuellement électrisée sur quelques points par la présence

(1) *Acad. des Sciences de Turin* (Séance du 2 décembre 1888) et *Rev. Int. de l'Elect.*, T. VIII, 1889, p. 349.

des nuages orageux. Les édifices, les arbres, les corps vivants frappés par la foudre ne doivent être considérés que comme des intermédiaires qui se trouvent sur son chemin et qu'elle frappe en passant. Toutefois, il ne faudrait pas conclure que ces intermédiaires sont essentiellement passifs et qu'ils ne contribuent pas à modifier ou même à déterminer la direction du coup de foudre. Il est certain au contraire qu'ils exercent à cet égard une action d'autant plus grande qu'ils ont une étendue plus considérable et une conductibilité meilleure. »

On peut donc conclure de tout ce qui précède qu'un grand nombre de paratonnerres peut amoindrir la force d'un orage et hâter la chute du potentiel électrique, mais que l'action principale d'un paratonnerre est de déterminer le passage du courant. Nous allons voir dans le paragraphe suivant à quelle distance se fait sentir cette influence.

VI. Zone de protection

Cette question, d'une importance capitale, prouve bien que l'action des tiges métalliques ne peut être que préservatrice dans un faible rayon ; lorsqu'il s'agit d'installer des paratonnerres, la zone de protection est toujours discutée, bien que son étendue ait été sans cesse réduite depuis Franklin.

D'après l'ordonnance de 1823 la distance à laquelle un paratonnerre étend sa sphère d'action n'est pas connue exactement et dépend d'ailleurs de beaucoup de circonstances particulières, mais plusieurs observations ont appris que des parties d'édifices situées à une distance de la tige de plus de trois ou quatre fois sa longueur ont été foudroyées.

Pour le physicien Charles, un paratonnerre ne peut défendre qu'un espace circulaire d'un rayon double de sa hauteur, à partir du sol. Mais, en 1843, W. Snow Harris, est d'avis que cette règle ne peut être générale, et que le rayon est loin d'être toujours le double de la hauteur. On reconnut en effet, peu de temps après, que si l'édifice est surmonté d'un clocher s'élevant à 30 *m.* au-dessus des combles, par exemple, le rayon de base du cône de protection doit être réduit à la hauteur du clocher, c'est-à-dire à 30 *m.* au lieu de 60.

Pouillet fait ensuite remarquer, dans son instruction de 1854, que le rayon de protection ne peut être aussi grand pour un édifice dont les couvertures sont en métal que si elles étaient en bois, en tuiles ou en ardoises.

Puis d'après la commission de 1875 : Une tige protège efficacement le volume d'un cône de révolution ayant la pointe pour sommet, et la hauteur de cette tige mesurée à partir du faîtage multipliée par 1.75 pour rayon de base. Ainsi une tige de 8 *m.* protège un cône dont la base mesurée sur le faîtage aura pour rayon $8 \times 1.75 = 14$ *m.*

Actuellement cette zone n'est plus que d'une fois la hauteur de la tige, et encore Melsens ne croit cette protection réelle que pour un cône dont le rayon de base sera égal à la moitié de la hauteur du paratonnerre ; « Finalement, dit-il, on aura beau la réduire tant qu'on voudra, elle ne sera jamais acceptée sans contradictions. » « Mais, comme dit M. Evrard, il vaut mieux croire moins que plus, Melsens que Gay Lussac, jusqu'à ce que le contraire soit prouvé » (1).

(1) *Lumière Electrique*. T. XXII p. 471.

VII. Vérification des Paratonnerres

La presque totalité des accidents produits par la foudre sur des édifices pourvus de paratonnerres, vient de la mauvaise installation de ceux-ci, et l'on conçoit combien est indispensable une fréquente et minutieuse vérification; malheureusement, elle est beaucoup trop rare, ou encore négligemment faite avec des appareils imparfaits. Peut-on considérer comme sérieux le moyen par trop rudimentaire employé presque toujours cependant, et qui consiste à relier la tige du paratonnerre avec un des fils d'une sonnerie dont l'autre se rattache au pôle d'une pile en communication avec le sol? La sonnerie en résonnant doit annoncer que les conducteurs sont en bon état. On met encore dans le circuit un galvanomètre, et la déviation de l'aiguille indique comme la sonnerie une bonne conductibilité. Il est facile cependant de comprendre que cette conductibilité n'est pas ainsi sérieusement vérifiée, car si la rouille a rongé une partie des conducteurs, il suffit qu'ils soient encore en contact par une seule molécule, pour que le courant de la pile agisse sur le galvanomètre ou sur la sonnerie. De plus, cela ne prouve nullement que les raccords du conducteur avec les pièces métalliques de l'édifice soient en bon état. Par suite, le meilleur moyen de vérifier une ligne aérienne, c'est de se rendre compte, *de visu*, par une inspection minutieuse, de l'état des soudures et des raccords.

Mais on ne peut procéder de même pour la ligne de terre qui doit être aussi soigneusement contrôlée. On se sert alors des instruments de résistance, tels que le pont de Wheastone modifié, de manière à se rendre un compte

exact de la bonne conductibilité du fil de terre. Le Dr Nippoldt emploie un pont à téléphone, inventé par le professeur Kohlrausch de Vurzbourg, et envoyé par Hartmann à l'exposition de Vienne en 1883 (fig 54). C'est une combinaison des ponts de Wheastone et de Kirschoff; il est formé d'un fil de 0,25 *m.*, et de 4 résistances de comparaison, de 1, 10, 100 et 1000 ohms, et on peut, suivant les corps dont on mesure la résistance, remplacer le galvanomètre G par un téléphone T; dans ce cas on retire la première cheville S, et on met le commutateur sur *a*' et non plus sur *a* (fig. 55). Cette résistance doit être de 1 à 10 ohms pour un très bon paratonnerre, elle peut aller sans danger jusqu'à 25 ohms, mais on peut obtenir dans des conditions défavorables de terrain, des résistances beaucoup plus grandes.

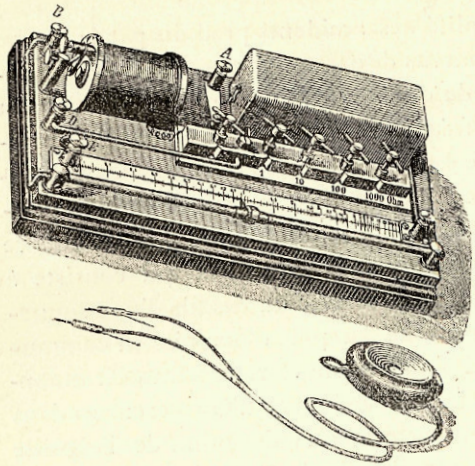

Fig. 54.

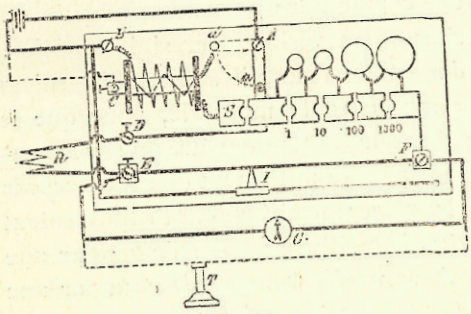

Fig. 55.

D'un autre côté les conditions de résistance que le sol oppose à la transmission électrique, varient en raison des courants telluriques et des effets de polarisation qui se trouvent déterminés par suite du contact des plaques de communication avec le sol. Il importe donc de pouvoir calculer ces variations de résistances. D'après les expériences de Du Moncel (1), ces résistances sont extrêmement variables suivant les dimensions des plaques de terre, et selon le sens dans lequel le courant se propage.

M. Fancisque Michel propose le moyen suivant, pour mesurer la conductibilité des paratonnerres, et pour calculer de plus les variations de résistance du sol. Il vérifie la ligne aérienne en employant la méthode du pont de Wheastone : Soit TPP' un paratonnerre, (fig. 56) A la pile d'essai, G le galvanomètre, R les bobines de résistance servant de rhéostat. On met les fils de cuivre FF', dont la résistance a été exactement déterminée, en communication, le premier F, avec la tige au dessus du collier de prise du courant, et l'autre F' va rejoindre le conducteur au moment de son entrée dans le sol. Cette disposition permet de s'apercevoir du mauvais état d'une soudure ou d'un raccord, et d'en relever l'endroit exact. M. Michel mesure ensuite la résistance du sol, en changeant le contact du fil

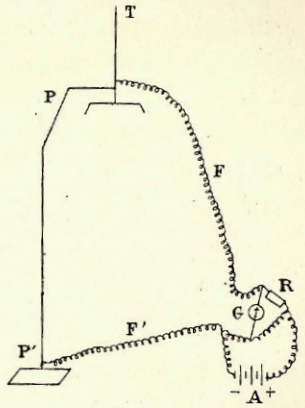

Fig. 56.

(1) *Annales Télégraph.* T. IV, p. 465, *et de la Transmission électrique à travers le sol*, Du Moncel.

F, que l'on met en communication avec une petite plaque de 0,01 *m. car.* (fig. 57) de même nature que la grande plaque du paratonnerre, et enfouie à 5 *m.* de cette grande plaque, distance à laquelle la conductibilité directe dans le sens interpolaire du sol, se trouve à peu près effacée ainsi que l'ont reconnu du Moncel et Trêve. M. Michel obtient dans les deux sens du courant, en renversant les communications de la pile avec les deux plaques, les deux chiffres de résistance, dont il faut tenir compte dans les vérifications des fils de terre des paratonnerres, et si la différence de ces deux chiffres est par trop grande, il faut modifier les contacts des conducteurs avec le sol (1).

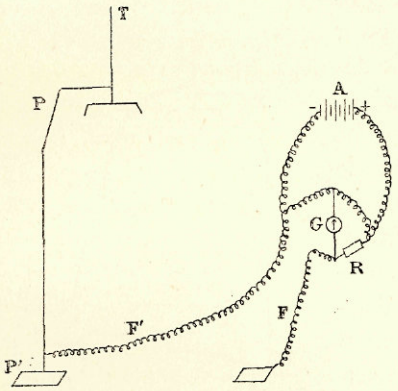

Fig. 57.

M. J. Miesler, de Vienne, considère comme tout à fait insuffisante l'épreuve des installations de paratonnerres au moyen d'une batterie ou d'un pont de mesure parce que la décharge de la foudre, de même que celle d'une bouteille de Leyde, a le caractère d'un mouvement électrique oscillatoire qui ne suit nullement les lois établies par Ohm, par Kirschoff, etc. pour les courants continus. L'expérience enseigne que la foudre choisit souvent un chemin offrant des millions d'ohms de résistance alors qu'elle pourrait en prendre d'autres où la résistance

(1) *Comptes rendus de l'Acad. des Sciences,* pour 1876, T. I, p. 342.

serait moindre. M. Lodge de Londres avait en effet remarqué qu'il faut compter, en outre de la résistance électrique du conducteur, deux autres quantités qui jouent un rôle important, à savoir : la self-induction et la capacité.

Une des expériences les plus importantes que le savant anglais a faites à ce sujet consiste à offrir deux voies différentes à la décharge des enveloppes extérieures de deux bouteilles de Leyde dont le revêtement intérieur est relié aux conducteurs d'une machine à influence. L'une de ces voies est aérienne, c'est un intervalle assez faible pour que la décharge s'y effectue sous forme d'étincelles, l'autre est un fil métallique; d'après la loi de Ohm, la décharge devrait passer exclusivement par cette dernière voie. Mais il n'en est pas ainsi, les étincelles jaillissent au contraire, en dépit de l'existence du conducteur à faible résistance. Avec un fil de 10 mètres de longueur on a trouvé :

	Résistance	*Longueur des étincelles*
Fil de cuivre fort.....	0.025 ohm.	14.3 millim.
— mince.....	2.720 —	13.4 —
Fil de fer fort.....	0.086 —	10.8 —
— mince.....	3.55 —	10.8 —
— très mince.....	33.3 —	10.3 —

Malgré la grande différence de résistance des fils de fer on n'a pas constaté de changement appréciable dans la longueur des étincelles; le fil de cuivre semble d'ailleurs le moins favorable au passage de la décharge.

D'autre part, d'après les constatations de M. J. Moser dans sa conférence sur les expériences de M. Hertz, la durée d'une oscillation de la décharge atmosphérique se compte par millionièmes de seconde; ce mouvement oscillatoire ne peut donc remplir en entier la section du conducteur et

se propage plutôt à la surface. Il en découle cette conséquence pratique : qu'il faut donner aux conducteurs de paratonnerre la plus grande surface possible ; par exemple au lieu d'un conducteur rond on prendra un faisceau de fils nombreux et minces ou bien un ruban métallique comme pour le paratonnerre de M. Grenet. Des essais ont, en outre, démontré que le fer est préférable au cuivre et en Amérique on emploie presque exclusivement le fer galvanisé.

Il résulte encore des autres expériences de M. Lodge : 1° que l'on doit relier au paratonnerre les masses métalliques qui font saillie au-dessus de la construction à protéger par leurs deux extrémités : inférieure et supérieure ; 2° que des décharges secondaires peuvent se produire à travers un bâtiment parfaitement protégé à l'extérieur si des objets métalliques pointus se dressent isolés dans l'intérieur de ce bâtiment.

On doit encore s'assurer que les tiges de platine ne contiennent pas de plomb. M. de Luca s'aperçut de cette fraude sur deux paratonnerres de l'Observatoire du Vésuve qui furent en partie fondus par un coup de foudre en 1876 ; il en détermina la densité et ses calculs lui donnèrent 19,09 et 18,65 ; il put constater la présence du plomb par des réactifs à l'acide nitrique. De même M. F. Michel a trouvé de 8 à 17 o/o de plomb dans les tiges des paratonnerres placés sur les édifices municipaux de Paris (1). On doit se rappeler, dit M. de Luca, que la densité du platine est de 21 et que de plus le mélange du plomb au platine se reconnaît facilement au chalumeau dont la flamme se colore en vert (2).

(1) *Comptes rendus de l'Acad. des Sciences pour 1876*, T. I. p. 1274.
(2) *Comptes rendus de l'Acad. des sciences pour 1876*, T. I. p. 1187.

VIII. Efficacité des paratonnerres

L'action des paratonnerres est certainement efficace ; ils protégent contre la foudre le bâtiment qu'ils surmontent et des faits nombreux, soigneusement relevés, sont venus l'affirmer. Mais nous avons suffisamment parlé des soins minutieux qu'il faut apporter dans la construction des paratonnerres, du peu d'étendue de leur zone de protection et de l'opération si délicate de la vérification pour pouvoir conclure qu'il ne faut pas se livrer à une trop grande sécurité dans un édifice pourvu de paratonnerres. Une modification survient dans la construction du bâtiment ; si l'on oublie de relier au conducteur les nouvelles poutres ou pièces métalliques, cela suffit pour rendre dangereux le voisinage de la tige. Et si même elles sont toutes bien jointes à ce conducteur par des soudures intactes, le danger est-il écarté ? Ce n'est pas l'avis de tous les constructeurs, car Perrot, en 1862, assurait que, dans le cas d'un coup foudroyant, une personne placée près d'une masse métallique en communication avec le conducteur recevrait un choc violent qui aurait été presque nul si cette masse se fût trouvée isolée. Mais n'oublions pas qu'il jaillirait alors des étincelles d'induction bien autrement dangereuses que le choc dont parle Perrot, en admettant qu'il se produise.

Cependant nous ferons remarquer que l'on n'établit pas en général les paratonnerres sur les poudrières, car la moindre étincelle peut être la cause d'accidents d'une gravité exceptionnelle ; on les installe à côté : des mâts conducteurs portent la tige métallique et sont reliés entre eux par des fils de terre qui vont aboutir à une nappe d'eau souter-

raine. On considère ce système comme le meilleur préservatif; il est évident que s'il pouvait être employé partout, cela supprimerait bien des commentaires et bien des discussions sur le mode de construction des paratonnerres; la vérification serait facile et leur présence deviendrait sans danger.

Planté n'est pas convaincu de l'efficacité complète des paratonnerres dans les cas de foudre globulaire. Si l'on considère : « que l'apparition du globe fulminant révèle un commencement d'écoulement abondant et continu de l'électricité de la masse nuageuse en un point d'élection particulier et que la simple action d'influence exercée par le voisinage d'un paratonnerre ne saurait arrêter cet écoulement une fois déterminé..., il y a en quelque sorte une électrode nuageuse constituée, c'est à dire une voie suivie qui ne peut être déviée par le voisinage d'une autre électrode telle que celle d'un paratonnerre destiné à agir par influence sur des nuées électrisées d'une grande étendue placées directement au-dessus. De même dans notre expérience du globule électrique ambulant l'approche d'une pointe ne modifie point la marche du phénomène (1). » Il fait remarquer qu'on ne saurait trop multiplier, par conséquent, les directions dans lesquelles peut agir un paratonnerre pour prévenir la formation de ce point particulier d'écoulement d'un flux abondant; c'est à dire que Planté préfère le paratonnerre Melsens à pointes multiples.

M. Discher est de cet avis; il rappelle que les partisans du système à tige unique se fondent sur ce que le grand éloignement des nuages au-dessus du paratonnerre rend leur influence très minime et que par suite l'emploi des

(1) *Phén. Élect. de l'Atmosph.*, G. Planté, p. 53.

pointes multiples n'a pas de but. Mais « du moment, dit M. Discher, qu'on admet l'influence d'une pointe sous forme de neutralisation sans bruit, quelque faible qu'elle soit, il nous semble que cette influence doit croître d'autant avec l'emploi d'un grand nombre de pointes » (1).

A quelles conclusions arriverait-on si l'on adoptait sans restriction la théorie de M. Moussette qui généralise le cas particulier de la foudre globulaire ou même si l'on admettait seulement avec M. de Parville que l'éclair en boule est beaucoup plus fréquent qu'on ne le pense? On douterait trop souvent de l'efficacité de nos paratonnerres et il ne faudrait alors accorder une certaine influence qu'aux tiges de Melsens.

D'après tout ce que nous avons dit, telle n'est pas notre conclusion; sans doute il ne faut pas voir dans le paratonnerre un signe de sécurité absolue mais lorsqu'il est bien établi et vérifié soigneusement, il protège ordinairement, dans les villes surtout, les édifices qu'il surmonte.

(1) *Poste austro-hongroise* n° 25, 18 juin 1884.

CHAPITRE IV

GRÊLE

La formation de la grêle est encore problématique. On a cru maintes fois en avoir définitivement déterminé les origines ; mais les solutions proposées sont loin d'avoir été adoptées par tous. Comme la plupart des troubles atmosphériques, ce phénomène a donné lieu à de nombreuses hypothèses qui s'entrechoquent, se détruisent ou se modifient suivant qu'elles sont complètement dissemblables ou peuvent se relier entre elles. Tel système est basé sur des observations météorologiques et ne veut pas céder devant tel autre qui résulte d'expériences et d'analogies obtenues en laboratoire. De là naissent de curieuses discussions qui amènent théorie sur théorie, réfutations sur arguments, et chacun, cantonné dans son absolutisme, semble moins viser à résoudre le problème qu'à combattre son adversaire. La question n'est pas tranchée.

Certains météorologistes, ennemis déclarés de l'électricité, appellent à leur aide la force mécanique, la chaleur, sans vouloir tenir compte des phénomènes électriques qui

précèdent et accompagnent *toujours* les orages de grêle; s'ils en admettent la présence, c'est seulement comme effet, comme dérivatif, sans lui attribuer un rôle plus important. Ils paraissent douter des moyens dont cet agent dispose, ils voudraient ignorer que, si la force et la chaleur engendrent l'électricité, celle-ci, à son tour, par la loi de la convertibilité, rend la chaleur et la force et même les produit directement.

Malgré toutes les subtilités de la météorologie, les propositions des électriciens sont en général plus favorablement accueillies; il est en effet plus rationnel d'admettre ici la présence active de l'électricité que de lui enlever toute participation à un phénomène prenant *exclusivement* naissance dans les nuages orageux. Autrement, il faudrait se livrer à des discussions ambiguës pour savoir si l'électricité produit l'orage ou bien si l'orage produit l'électricité et fixer le moment précis de cette formation. Et encore serait-on convaincu?

Ecoutons à ce sujet Manuel Rico y Sinobras, membre de l'Académie des Sciences de Madrid : « Quelques météorologistes et entre autres Kaemtz, étudiant avec soin les phénomènes des tempêtes, sont d'avis que l'électricité atmosphérique dans ces météores est un effet de la condensation des vapeurs en un espace plus ou moins grand, et ils en déduisent que ce n'est pas la tension électrique qui produit les orages, mais que la forte condensation produit l'électricité. Pour soutenir cette thèse, ils ont supposé que, de même que la chaleur est à l'état latent au milieu des vapeurs, l'électricité s'y trouve dans un état semblable et disposée à devenir libre et énergique quand les vapeurs se condensent. » (1)

(1) *Discurso que sobre los fénomenos de la electricidad atmosferica*

Citons encore les expériences de M. Shelford-Bidwell; il démontre que l'opacité de la vapeur sortant d'une conduite augmente notablement lorsqu'on en approche des objets électrisés et que sa couleur devient brun orangé. Des balles et disques électrisés placés dans la vapeur produisent des effets semblables et lorsqu'ils sont reliés avec une machine à influence en fonctions, il y a décoloration rapide du jet à chaque étincelle. En examinant le spectre d'absorption du jet non électrisé, on ne remarque rien d'anormal. Mais dès qu'on l'électrise, le violet disparaît, le bleu et le vert diminuent, tandis que l'orangé et le rouge ne changent pas (1). Ces observations expliqueraient la cause de la couleur foncée des nuages orageux et la lumière jaune pâle qui tempère souvent cette obscurité. On pourrait ainsi faire ressortir de cette expérience cette curieuse inversion à savoir que si la condensation des vapeurs élève le potentiel électrique de l'atmosphère l'électrisation augmente à son tour la condensation des particules aqueuses.

Après ces diverses considérations et si l'on se reporte à nos premiers chapitres on se trouve de moins en moins persuadé que l'électricité n'a pas d'action puissante sur les orages en général, sur les orages de grêle en particulier et même qu'elle n'en est pas la cause principale. Il faut ajouter cependant que ces conclusions ne sont pas admises sans restriction.

Comme on le voit, la grêle mérite d'attirer notre attention, les ravages qu'elle produit sont nombreux et ses dégâts sont évalués chaque année à 40 millions de francs en moyenne depuis le commencement du siècle. Il est donc intéressant de rapprocher les systèmes si divers tendant à

(1) *Physical Society of London.* Séance du 6 décembre 1889.

expliquer la formation de ce fléau, appuyés les uns et les autres sur de sérieux arguments, et de les comparer entre eux. Mais pour se rendre bien compte de ces théories et de leurs conclusions, il importe d'énumérer préalablement les phénomènes qui précèdent et accompagnent l'orage de grêle, de décrire les différentes phases qu'il traverse depuis sa formation jusqu'à la chute des grêlons. Nous relèverons donc successivement les observations désintéressées que l'on recueille à chaque nouvelle apparition de l'orage sur : l'heure, la saison préférée, l'aspect du nuage à grêle, le bruit précurseur, les phénomènes électriques, la forme et la grosseur des grêlons.

I. Particularités des orages de grêle

1° La grêle ne tombe pas avec la même fréquence dans toutes les saisons ; on en constate de plus nombreuses apparitions en été et même les violentes chutes de grêlons ne sont guère signalées qu'à des époques qui varient entre le mois d'avril et le mois d'octobre. Cependant, d'après le tableau que nous empruntons à Kaemtz, en égalant à 100 le nombre de fois qu'il grêle dans l'année, on a les proportions suivantes :

	HIVER	PRINTEMPS	ÉTÉ	AUTOMNE
France.....	32,8	39,4	7	20,7
Angleterre.....	54,5	29,5	29,3	22
Allemagne.....	10,3	46,7	29,4	13,6
Russie.....	9 9	35,5	50,6	13

La grêle tomberait donc en Angleterre plus fréquemment pendant l'hiver, en France et en Allemagne au printemps, en Russie l'été.

Nous croyons toutefois que les chutes de grésil et de petite neige ont été confondues avec les véritables averses de grêle dans cette statistique ; on remarquera d'ailleurs que les orages cités plus loin sont tous survenus en été.

2° Selon les besoins de leur cause, les météorologistes signalent les chutes de grêlons à telle ou telle heure de préférence. Les partisans de l'évaporation par les rayons solaires et qui font nécessairement intervenir la chaleur diurne dans leur hypothèse, assignent par exemple à l'orage le milieu du jour. En réalité la grêle tombe surtout pendant la seconde moitié du jour et les orages nocturnes sont relativement rares (v. p. 138).

3° Les courants atmosphériques qui donnent naissance aux nimbus où s'élabore la grêle viennent le plus souvent du sud-ouest, ou bien ils ne parcourent guère que quelques degrés du compas dans les directions est et ouest. De plus ces nimbus ont été généralement rassemblés par des courants opposés qui sont venus contrarier le courant principal (1).

4° L'observateur, attentif aux manifestations de l'orage, voit ordinairement l'atmosphère, qui n'était parcourue que par des cumulus, se recouvrir lentement d'une brume épaisse dont la teinte s'obscurcit de plus en plus pour former, par sa condensation, des nimbus noirâtres à bords déchiquetés dont le centre, comme boursouflé, prend des reflets roux. Les nuées s'accumulent, se superposent pour ainsi dire sous l'action des vents contraires, de larges gouttes

(1) Pour la formation des orages en général, voir p. 120.

de pluie tombent accompagnées de roulements et d'éclairs qui illuminent la voûte sombre. Puis tout à coup, des crépitements, des craquements semblent déchirer la structure des nimbus et quelques secondes après les grêlons sont précipités sur le sol (fig. 58).

5° La bande de terrain qu'ils recouvrent est relativement restreinte et souvent la grêle alterne avec une bande de pluie. Par exemple, l'orage du 13 juillet 1788, décrit par Teissier, et qui traversa la France et la Hollande, s'étendit en deux bandes à peu près parallèles dirigées du sud-ouest au nord-est. La bande orientale avait une largeur moyenne de 8 *kilom.* et une longueur de 700; la bande occidentale offrait une largeur de 16 *kilom.* et une longueur de 800; l'espace compris entre ces deux bandes et qui avait 20 *kilom.* ne reçut qu'une pluie abondante. La grêle tomba avec une telle force pendant 7 ou 8 minutes sur chaque point

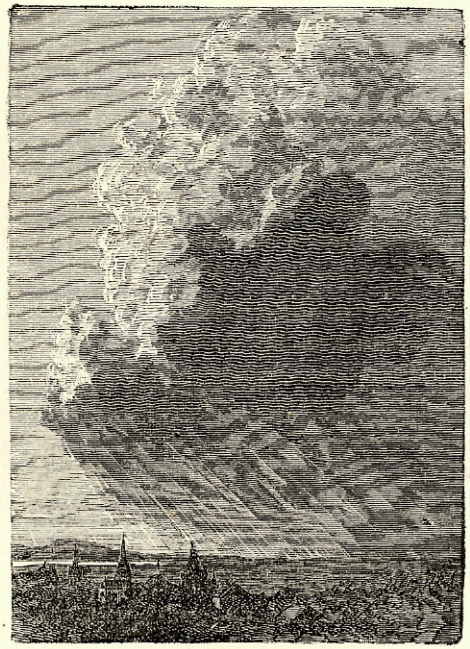

Fig. 58.

que les moissons furent hachées et la perte fut évaluée à 25 millions.

6° Suivant Arago, les nuages à grêle sont peu éloignés du sol et il lui est arrivé de constater que les collines surmontant la vallée où sévissait l'orage jouissaient d'un ciel pur. Au contraire d'Arago, dont la constatation semble être une exception, Colladon en a observé de fort élevés et a pu, grâce aux montagnes voisines, leur attribuer approximativement une hauteur de 5,000 *m.* Saussure a vu grêler à 3.400 *m.* au col du Géant; Boussingault dans les Andes à 6,000 *m.* En résumé, il arrive souvent que les nuages à grêle se trouvent à une assez petite distance du sol, mais leur épaisseur est telle ou plutôt leurs couches superposées sont si nombreuses que leur surface supérieure peut atteindre de très grandes hauteurs (1).

7° Le bruit strident qui précède la chute des grêlons a été constaté par tous les observateurs; on l'a comparé au bruit causé par un sac de noix que l'on remue, ou à celui d'une charrette ferrée roulant sur un chemin rocailleux, ou encore à une décharge de mousqueterie. Peltier étant à Ham, crut à l'arrivée, au galop, d'un escadron de cavalerie sur les pavés de la ville; quelques secondes plus tard, une averse de grêle venait lui donner l'explication de ce phénomène (2). M. Plumandon, météorologiste à l'observatoire du Puy-de-Dôme, fait exception et assure que ce bruit ne précède pas, mais accompagne ou plutôt suit la chute des grêlons : ce roulement, ce crépitement vient des alentours et ne serait autre chose que le bruit causé par les grêlons frappant le sol, les arbres ou le toit des maisons, suivant le lieu. D'après M. Plumandon, l'observateur ne distin-

(1) Voir page 125, hauteur et constitution des nuages orageux.
(2) *Traité des Trombes*, Peltier, p. 110.

guerait plus ce bruit quand la grêle et la pluie tombent autour de lui, mais le roulement renaît du côté où l'orage s'est éloigné.

8° Quant à la tension électrique dans l'atmosphère et sur le sol pendant les orages de grêle, elle est arrivée à son maximum. L'électromètre indique la présence de l'électricité ainsi que son signe qui change fréquemment. Selon Arago, elle passe du positif au négatif plusieurs fois par minute. Au contraire, M. Lephay, lieutenant de vaisseau, constate dans ses notes, prises au cap Horn, une tension presque *constamment* négative qui se ferait sentir d'après Palmieri à une distance pouvant aller jusqu'à 70 *kilom.* Le savant observateur italien confirme la remarque de M. Lephay et pose le principe suivant : « Si par un ciel clair on note la présence de l'électricité négative, on peut être certain qu'il pleut ou qu'il grêle à une certaine distance. » Il ajoute que si pendant la grêle on constate un changement de positif au négatif, cela indique une plus forte grêle sur quelque autre point. Cette dernière remarque expliquerait les variations relevées à l'électromètre par Arago (v. p. 51 et 55).

Enfin le P. Beccaria assure que si la pluie cesse avec une forte tension électrique positive, c'est le beau temps assuré pour plusieurs jours.

Toutes les descriptions des orages de grêle constatent la manifestation de l'électricité.

On lit, dans un rapport adressé à l'Académie des Sciences en 1865, par M. Lhermoyez, ingénieur, au sujet d'un orage qui avait dévasté la vallée de l'Escaut : « de gros nuages formant des couches superposées se montrèrent au sud-ouest et bientôt le tonnerre se fit entendre. Au-dessus de leur masse se dressait un cumulus d'un blanc livide

dans lequel se produisait un pétillement continu d'éclairs... le roulement du tonnerre était continu mais sans intensité, sans fracas... » (1).

M. Colladon décrivit à l'Académie des sciences un orage nocturne qui sévit dans la vallée du Rhône et de l'Arve « ... Les éclairs se succédaient avec une telle rapidité depuis minuit jusqu'à une heure et quelques minutes, que l'on comptait en moyenne deux ou trois éclairs par seconde, ce qui ferait huit à dix mille par heure... Des phénomènes intenses de phosphorescence électrique ont été remarqués sur le sol, sur les animaux, sur les objets saillants ; les grêlons étaient aussi phosphorescents. Une odeur d'ozone très violente a été remarquée après la grêle... » (2).

L'orage qui éclata le 18 août 1890 au parc de Baleine, (Allier) a été d'une violence inouïe ; commencé à 4 h. de l'après-midi il atteignit son maximum à 7 h. 30 m. du soir. Après quelques coups de tonnerre préliminaires ce fut comme un embrasement formidable des nuées orageuses. Les décharges se multipliaient sans interruption, les éclairs éblouissants et continus, aveuglaient et ne permettaient pas à l'œil de les compter. La grêle tombait avec furie, les rafales de vent passaient rapides, se heurtant aux obstacles qu'elles renversaient (3).

On a souvent observé que pendant les orages de grêle, les coups de foudre frappent rarement le sol, mais que, au contraire, les décharges électriques se produisent presque toujours dans l'intérieur des nuages d'où s'échappent les grêlons. Les éclairs jaillissent sans ce déchirement strident et métallique qui indique une décharge entre la nuée et le

(1) *Comptes rendus de l'Acad. des Sciences pour 1865*, T. I, p. 1020.
(2) *Comptes rendus de l'Acad. des sciences pour 1875*, T. II, p. 104.
(3) *Revue scient. 1890*, T. II, p. 350.

sol, mais avec un sourd grondement, ainsi que le fait remarquer M. Lermoyez, avec une sorte de roulement continu, qui peut s'interrompre soudain sans que pour cela le feu électrique cesse d'éclairer et de rayer le nuage.

Enfin, quand la grêle a cessé, les phénomènes électriques peuvent encore se manifester. M. Godefroy, professeur de sciences, signale un fait curieux d'électrisation qu'il observa à la Chapelle-Saint-Mesmin près d'Orléans, pendant un orage, le 18 juin 1881. Il vit des grêlons rebondir violemment et à plusieurs reprises contre les murailles à la manière des corps électrisés : « J'en observai un entre autres, dit-il, dont j'ai pu suivre les évolutions capricieuses. C'était un grêlon sphéroïdal; il avait frappé le sol d'une galerie et roulait dans un couloir où il s'était engagé, lorsque tout à à coup il rebondit brusquement et alla frapper avec violence de bas en haut la cloison qui se trouvait en face; celle-ci le renvoya à peu près au point de départ, où il se mit à tourner rapidement sur lui-même suivant un axe vertical comme le ferait une toupie. J'eus tout le loisir d'étudier ce phénomène, qui dura de cinq à six secondes au bout desquelles la rotation s'arrêta » (1).

Cette observation trouve un écho et une confirmation dans celle que M. Colladon avait faite à Genève, le 19 janvier précédent, sur des grains de grésil compacts et sphériques : « La tablette de ma fenêtre était recouverte d'une nappe de ces grains de grésil sans aucun mélange d'autres flocons. Ces grains avaient des soubresauts électriques fort singuliers, rappelant la danse des pantins ou les mouvements saccadés des petits fragments de moelle de sureau quand on approche d'eux un bâton de verre ou de

(1) *La Nature*, 1882, T. II, p. 141.

résine préalablement électrisé. Des grains de grésil, d'abord immobiles pendant deux ou trois secondes, étaient subitement lancés à quelques centimètres de distance et paraissaient bondir en sursaut par une forte répulsion presque normale à la surface de la tablette. Puis ils se précipitaient sur quelque point voisin recouvert de grésil... » (1).

On peut encore rapprocher de ce qui précède l'expérience de M. Ferré instituteur à Paris : il eut l'idée, à la Varenne-Saint-Hilaire, en novembre 1890, de soumettre des cristaux de neige à l'influence d'un aimant; il les vit aussitôt se disposer en croix, en étoiles, en aigrettes, à la manière des corps électrisés. Il en déduisit cette hypothèse que l'on peut attribuer à l'électricité atmosphérique les formes bizarres et jusqu'ici inexpliquées des flocons neigeux.

II. Aspect et composition des grêlons.

Grosseur. — Les dégâts causés par la grêle sont d'autant plus grands que la grosseur des grêlons est considérable. A ce sujet, de nombreuses discussions se sont élevées sur leur dimension et sur leur poids, on s'est demandé longtemps s'il fallait qualifier de fabuleux le grêlon *gros comme une meule de moulin* qui tomba dans un champ, en 1843, et fut trois jours à fondre (2). Après un examen plus approfondi, on a reconnu que de tels blocs de glace sont formés de grêlons agglutinés, et s'ils viennent à flotter sur des rivières, ils peuvent devenir de véritables banquises.

Evidemment, on ne niera pas que ces faits se soient produits, car les grêlons peuvent très bien s'agglomérer, se

(1) *Comptes rendus de l'Acad. des Sciences* pour 1881, T I, p. 212.
(2) *Voyage en Tartarie*, P. Huc, T. I. p. 5.

souder entre eux pour ne former qu'un tout, soit avant, soit pendant ou après leur chute. Mais on doit aussi, dans certains cas, les avoir confondus avec des averses de glaçons, plus rarement observées, et dont les causes semblent moins problématiques. Il est probable que ces glaçons proviennent directement des cirrus dont les particules glacées, saisies par un courant froid, se réunissent et tombent de ces hautes régions sous la forme de blocs à structure irrégulière qui n'ont aucune analogie avec la grêle. M. J. Palmarts observa ce phénomène à New-Calabar, dans le golfe de Guinée, en 1872 (1).

En résumé, la grosseur des grêlons est très variable ; ordinairement ils ont le diamètre d'une noisette, mais il en tombe parfois de plus volumineux. Hallez rapporte que, le 29 avril 1697, il trouva dans le Flintshire des grêlons pesant 120 et 130 grammes ; le 4 mai suivant, Taylor en mesura dans le Hartfordshire qui avaient 3 décimètres de circonférence. Parent a vu dans le Perche, le 17 mai 1703, des grêlons gros comme le poing. Le 7 mai 1822, à Bonn, Noggerath en a recueilli dont le poids était de 190 grammes. Il tomba en 1831, à Constantinople, des masses qui, une demi-heure après, pesaient encore 500 grammes. En juillet 1889 on trouva à Changey en Bourgogne un grêlon de 972 grammes. Il a fallu que les grêlons aient un certain poids pour avoir défoncé, en 1829, des toitures, à Cazorta en Espagne, brisé à Granville des tuyaux de cheminées dans l'orage de juin 1865, percé un contrevent plein à Genève, en juillet 1875, une plaque de zinc à Bordeaux en mai 1886 et souvent ils ont blessé et même tué des passants comme à Varsovie en mai 1887.

(1) *Ciel et Terre*, 1883.

Forme.— Quant à leur forme, les grêlons ressemblent le plus fréquemment à une sorte de sphère irrégulière armée de pointes. Leur centre se compose en général d'un noyau

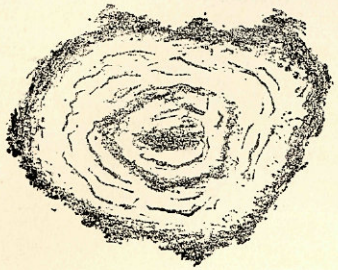

Fig. 59

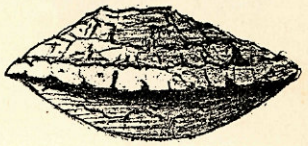

Fig. 60

opaque, d'une sorte de grain de grésil recouvert d'une couche de glace transparente (fig. 59), puis souvent une bande opaque alterne avec une bande transparente, ce qui semble indiquer qu'ils s'accroissent par des congélations successivement brusques, instantanées, puis lentes et progressives. On a quelquefois compté jusqu'à six ou huit de ces bandes.

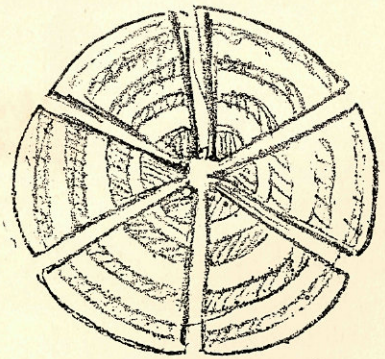

Fig. 61.

D'autres sont aplatis, à contexture rayonnante, semblables à des tranches de citron. Certains affectent la forme lenticulaire et sont si réguliers qu'ils peuvent servir de loupe (fig. 60).

M. le Goarant de Tromelin en recueillit aux Salins d'Hyères en mai 1883, qui semblaient être des fragments

de grêlons complètement sphériques (fig. 61). « Chacun de ces grêlons, écrit-il, est un secteur sphérique, ayant pour base soit un segment, soit un polygone sphérique et un rayon de 8 à 10 millimètres (fig. 62-63)... L'angle d'ouverture est

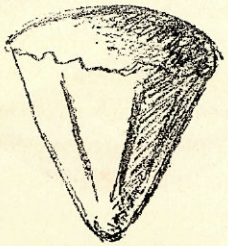

Fig. 62.

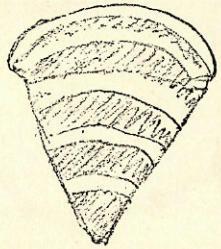

Fig. 63.

fort variable et presque tous sont ébréchés au sommet » (1). M. Godefroy en avait déjà observé de pareils à la Chapelle-Saint-Mesmin en avril 1877.

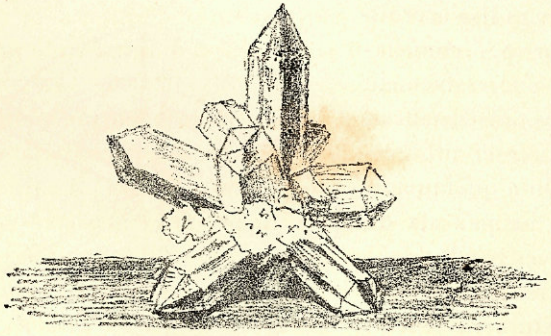

Fig. 64.

Enfin le P. Secchi recueillit à Grotta-Ferrata, en 1876, des grêlons d'une forme assez rare. L'apparence était celle de groupes de cristaux de quartz; la plupart à 4, 5 et 6 pans terminés par une pyramide (fig 64).

(1) *Comptes rendus de l'Acad. des Sciences* pour 1883. T. I.

Coloration. — Signalons en terminant une dernière singularité de la grêle. En Russie, M. Lagounovitch remarqua, en 1880, que certains grêlons présentaient des teintes rouges très nettement accusées, d'autres étaient d'un bleu pâle. Il ne put en déterminer la cause, mais il croit que la forme aurait quelque influence sur ces colorations.

M. J. A. Montpellier, que ses nombreux travaux en chimie et en électricité rendent doublement compétent, attribue cette teinte bleuâtre à la présence dans l'atmosphère d'acide azoteux, liquide bleu obtenu en laboratoire à l'aide du peroxyde d'azote ou acide hypoazotique, dans certaines conditions analogues à celles qui se présentent dans l'atmosphère. En effet, si l'on fait passer un courant électrique dans un mélange d'azote et d'oxygène, il se forme de l'acide hypoazotique dont la production devient naturelle pendant un orage; en présence d'une petite quantité d'eau et si le mélange s'opère lentement, l'acide hypoazotique donne naissance à l'acide azoteux.

L'année précédente on avait observé le même phénomène en Angleterre. Sur la côte d'Afrique, M. Dary, commissaire de la marine, a souvent vu des grêlons rouges ; il suppose que cette couleur doit être produite par des poussières rougeâtres; enlevées par des courants tourbillonnaires, ces poussières seraient transportées dans les hautes régions atmosphériques et y deviendraient le centre de grêlons en formation. Cette supposition est loin d'être invraisemblable puisque M. G. Tissandier, dans un rapport à l'Académie des sciences, parle le 18 juillet 1887 d'un grêlon contenant une pierre du poids de 2 grammes; il l'explique de la même manière.

Nous connaissons maintenant la grêle dans ses diverses

manifestations; quant à son origine, nous allons voir les théoriciens aux prises avec ce difficile problème.

III. Théories de la grêle

Comment expliquer la présence de noyaux congelés dans les couches basses de l'atmosphère dont la température est supérieure à 0° ?

Comment les grêlons s'accroissent-ils et de quelle manière peuvent-ils être retenus dans l'espace?

Quel est le rôle de l'électricité dans ces orages ?

Telles sont les principales questions auxquelles il faut répondre pour formuler une théorie de la grêle.

Sur tous ces points délicats les anciens sont muets ; ils réservaient leurs théories, souvent fantaisistes, pour les phénomènes qui impressionnaient le plus vivement leur imagination et les frappaient d'épouvante, mais on ne trouve nulle part qu'ils se soient occupés spécialement de la grêle. Descartes fut le premier qui, au XVII^e^ siècle, en discuta les origines, mais sans pousser très loin ses investigations; il nous parle seulement de particules flottantes congelées, sans bien s'expliquer sur la nature de ces particules et sur leur congélation. Si, par le fait de courants chauds, ces noyaux congelés fondent plus ou moins, ils forment, d'après Descartes, la pluie ou la neige, puis « ...Il arrive aussi quelquefois, dit-il, qu'après être ainsi fondus ou presque fondus, il survient quelque vent froid qui, les gelant derechef, en fait de la grêle. Or cette grêle peut être de plusieurs sortes ; car, premièrement, si le vent froid qui la cause rencontre des gouttes d'eau déjà formées, il en fait des grains de glace tout transparents et tout ronds, excepté qu'il les rend

quelquefois un peu plats du côté qu'il les pousse. Et s'il rencontre des flocons de neige presque fondus, mais qui ne soient pas encore arrondis en goutte d'eau, alors il en fait cette grêle cornue et de diverses figures irrégulières, dont quelquefois les grains se trouvent fort gros à cause qu'ils sont formés par un vent froid qui, chassant la nue de haut en bas, pousse plusieurs de ces flocons l'un contre l'autre et les gèle tous en une masse » (1).

Descartes a aussi observé la forme pyramidale de certains grêlons, mais il n'en cherche pas loin la cause; un froid plus ou moins vif briserait, selon lui, en plusieurs morceaux des grêlons sphériques. Il convient de remarquer que le savant philosophe ne parle pas des phénomènes électriques dans son chapitre de la grêle, pas plus qu'il ne mentionne de chutes de grêlons lorsqu'il discourt sur les orages et le tonnerre. Il ne paraît pas avoir été frappé par la réunion de ces deux phénomènes.

Après Descartes, c'est le P. Regnault qui voit dans la grêle un composé chimique. « Enfin, lorsque la pluie ou la neige presque fondue rencontre dans l'atmosphère, en tombant de fort haut, un vent bien froid ou quelque endroit plein de sels de nitre, de salpêtre, elle se glace, et c'est de la grêle. La grêle n'est qu'une espèce de pluie gelée. Dans sa chute, elle peut grossir à force de rencontrer des vapeurs qui s'attachent à elle, et se glacent en s'attachant. Mais, pourquoi tombe-t-il moins de grêle l'hiver que l'été? C'est que l'hiver les nuées s'élevant moins haut sur l'horizon, la neige est tombée avant que de se fondre ou la pluie avant que d'être glacée » (2).

Enfin nous voyons Muschenbroek et Hamberger rééditer

(1) *Œuvres complètes de Descartes*, T. V, p. 228.
(2) *Entretiens physiques* par le P. Regnault, T. IV, p. 117, 1754.

successivement les mêmes suppositions vagues que Descartes, sans y apporter plus de détails, et pour trouver une première théorie complète sur la grêle il nous faut arriver à Volta. Voici son raisonnement.

Lorsque les rayons solaires frappent la partie supérieure d'un nuage très dense, ils sont absorbés presque en totalité et il résulte de cette absorption une énorme évaporation. Cette évaporation, favorisée par la sécheresse de l'air qui est au-dessous du nuage et par l'état électrique de ce dernier, produit un abaissement de température assez considérable pour déterminer la formation de flocons de neige qui sont les embryons de la grêle. De plus, la partie du nuage qui est ainsi réduite en vapeur, est entraînée dans les hautes régions atmosphériques, s'y condense à nouveau et l'on a deux couches de nuages superposées soumises à une haute tension électrique de signe contraire, dont Volta suppose toujours la présence nécessaire et par laquelle il explique l'accroissement des grêlons et leur suspension dans les nuées.(1) Les noyaux congelés se trouvent attirés à la couche supérieure, lui empruntent son électricité et, repoussés par elle, ils retombent sur le nuage inférieur pour se charger de l'électricité contraire et se disposer à subir une nouvelle attraction vers le nuage supérieur. Ce va-et-vient suffit pour accroître le volume des grêlons par suite de l'évaporation

(1) On se souvient que M. Palmieri, ainsi que Volta, attribuait la présence de l'électricité dans l'atmosphère à l'évaporation produite à la surface du globe sous l'influence des rayons solaires (p. 102 et 108). Nous pourrions citer encore les nombreuses observations faites depuis le mois de mai 1885 jusqu'au mois de juillet 1889 par M. Albert Nodon ; il a établi que : 1° les radiations solaires en rencontrant un conducteur isolé, métal ou charbon, communiquent à ce conducteur une charge électrique positive.

2° La grandeur de la charge croit avec l'intensité des radiations solaires et décroit avec l'état hygrométrique de l'air. Le phénomène atteint à Paris sa valeur maximum en été vers une heure de l'après-midi lorsque l'atmosphère est pure et sèche.

3° Le passage des nuages devant le soleil fait cesser le phénomène.

M. Nodon en conclut que l'on peut considérer les radiations solaires comme l'une des causes de l'électrisation des nuages. (*Comptes rendus de l'Académie des Sciences pour 1889*, T. II, séance du 5 août).

Pour la discussion de cette question, voir le chapitre I, origines de l'électricité atmosphérique.

produite dans ces mouvements constants et lorsque, par leur poids, ils échappent aux lois de l'attraction électrique, ils obéissent à celles de la pesanteur et ils tombent sur le sol.

L'expérience connue, dite « danse des pantins », a servi de point de départ à Volta pour établir la seconde partie de cette théorie et, depuis, on présente dans les cabinets de physique une autre expérience, aussi connue, appelée « grêle électrique », dans laquelle des balles de sureau vont et viennent entre deux plateaux dont l'un est électrisé et l'autre en communication avec le sol.

Admise pendant longtemps, la théorie de Volta a été ensuite vivement combattue ; mais, si les adversaires ont été nombreux, les partisans ne lui ont pas manqué et elle en a encore de nos jours. En tout cas, il faudra remarquer que ce système, annulé en ce qui concerne l'intervention de la chaleur diurne et du froid produit, reste entier quant à l'action électrique, supposée cause principale du phénomène.

Bellani, élève de Volta, objecte le premier que les orages de nuit sont nombreux et, dans ce cas, on ne peut admettre la première partie de l'hypothèse, à savoir : l'évaporation par les rayons solaires.

Arago fait ensuite justement remarquer que l'évaporation, produite par l'échauffement des couches supérieures d'un nuage, n'a guère d'analogies avec l'évaporation causée par un vent froid et qu'il est difficile d'accepter que la chaleur solaire puisse évaporer un liquide sans en amener l'échauffement. « Chauffer un corps, dit-il, ne saurait être un moyen de le refroidir. »

Enfin M. Govi détruit la croyance que Volta avait puisée dans les expériences de l'abbé Nollet, de Guyton de Morveau pour faire activer par l'électricité l'évaporation des vésicules aqueuses du nuage considéré. M. Govi assure, d'après ses récents travaux, que cet effet est apparent. Des observations plus minutieuses lui ont permis de reconnaître que l'évaporation d'un liquide ne se produit pas plus rapidement sous l'action de décharges électriques lorsque ce liquide présente une surface parfaitement lisse. L'action des pointes seule en agitant les couches d'air voisines cause le renouvellement de ces couches et peut favoriser de cette manière l'évaporation et par suite le refroidissement.

Mais d'un autre côté, si la présence nécessaire et constante dans ces orages de deux couches nuageuses superposées, l'une basse, l'autre très élevée, est impossible à admettre sans exception, il ne faut pas assurer avec certains physiciens que la théorie de Volta est entièrement détruite par ce seul fait que les deux couches de nuages se forment indépendamment l'une de l'autre.

On sait en effet, depuis 1850, d'après les ascensions aéronautiques de MM. Barral et Bixio, que les nuages les plus élevés, les cirrus, (fig. 65) sont composés d'aiguilles de glace et de flocons neigeux, que ces cirrus se forment les premiers et que par suite ils ne peuvent être la conséquence d'une évaporation des nuages inférieurs. Mais cette seule observation

ne peut être une raison pour affirmer l'erreur de Volta en ce qui concerne la présence de deux couches de nuages électrisés, quand bien même il se serait trompé sur leur rang de formation.

On ne peut pas non plus adopter sans discussion les remarques de Pouillet qui semblent à certains points de vue quelque peu hasardées. Il dit à ce sujet : Comment une puissance électrique qui n'exerce pas son action d'une manière brusque et instantanée est-elle capable d'enlever

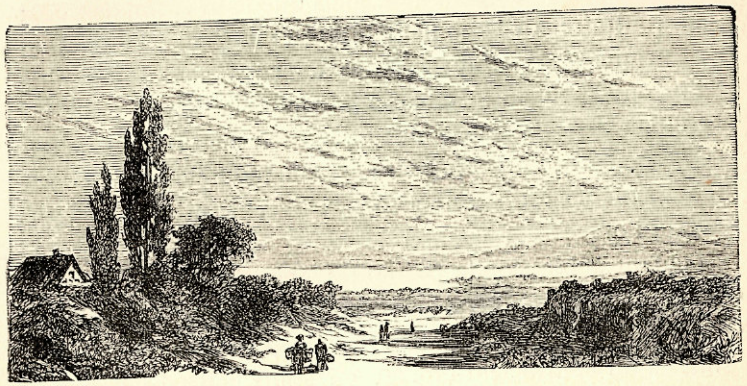

Fig. 65.

des blocs de glace du poids de 200 et 300 grammes? Comment se fait-il que l'étincelle ne parte pas entre le bloc et le nuage?

En outre, si les deux nuages sont fortement électrisés, comme ils doivent l'être pour enlever des masses pesantes, et si les grêlons font la navette dans l'espace qui les sépare, comment se fait-il que l'électricité ne s'écoule pas subitement d'un nuage à l'autre, d'autant plus que les grêlons forment entre ces deux nuages une sorte de communication qui favorise au plus haut degré l'explosion de l'éclair?

Il y aurait beaucoup à dire sur ces objections :

Lorsqu'un plateau électrisé enlève de légers fragments de moelle de sureau, il n'exerce pas plus d'action brusque et instantanée que le nuage qui enlève les grêlons ; l'un et l'autre se comportent de la même manière et les poids enlevés peuvent être proportionnels à la force électrique développée par le plateau et par le nuage. Et si même nous admettons l'impuissance de cette force dans certains cas, on sait que les noyaux congelés sont loin de peser tout d'abord 200 à 300 grammes, mais que le plus souvent c'est au contraire à ce moment qu'ils échappent à l'attraction électrique pour tomber. Nous ne voyons pas non plus d'inconvénients à ce que des étincelles jaillissent entre les grêlons dans la masse nuageuse et le pétillement de ces éclairs peut renforcer le bruit que font les grêlons en s'entrechoquant et c'est là, selon Volta, les déchirements entendus avant l'orage.

Quant à la seconde partie des objections de Pouillet, on peut également y répondre. L'électricité atmosphérique n'est pas, comme celle d'un simple conducteur, soumise à un épuisement rapide ; un afflux constant d'électricité est fourni à la masse nuageuse par la dépression qui se produit justement lorsque les grêlons lui enlèvent une partie de son électricité. Il se fait une sorte d'appel de l'électricité des hautes régions atmosphériques qui vient, par suite de la condensation croissante des vapeurs inférieures, remplacer celle qui s'est écoulée par l'intermédiaire des grêlons.

Pouillet pense avoir ainsi annulé la théorie de Volta et il en présente une nouvelle. Il suppose que le refroidissement est produit par les vents dits d'aspiration qui peuvent amener sur le sol un froid de 17°. C'est aussi le vent

froid qui entraîne les grêlons horizontalement ou du moins très obliquement dans l'atmosphère, qu'ils parcourent avec une vitesse de 50 à 60 *kilom.*, et ils n'ont plus besoin d'être suspendus pendant longtemps au-dessus des nuages très denses et très refroidis pour atteindre le volume énorme qu'ils ont quelquefois. Ce serait donc une même cause, un vent froid, qui produirait la congélation et l'accroissement des grêlons. Dans cette supposition, l'électricité ne serait que l'effet de la condensation des vapeurs nécessaires pour engendrer la grêle.

Quand bien même la présence de ces vents dits d'aspiration serait suffisamment démontrée, ainsi que leur mécanisme, cette hypothèse se trouverait détruite par les suivantes et surtout par les observations incontestées que nous avons relevées précédemment et avec lesquelles elle serait en perpétuelle contradiction. Il est donc permis d'abandonner la théorie de Pouillet pour en chercher une qui explique mieux les manifestations de l'orage.

Nous ne ferons que mentionner la théorie de Kaemtz : il fait intervenir des courants opposés amenant la présence de cumulus et le refroidissement de certaines couches atmosphériques ; puis naissent des tourbillons ascendants qui condensent les vapeurs aqueuses et transportent les noyaux congelés alternativement de bas en haut.

Ce système peut être considéré comme un intermédiaire entre les précédentes suppositions et la célèbre loi des tempêtes formulée par M. Faye en 1875 (1). Il considère les caractères essentiels de l'orage et les classe comme il suit :

1° Les nuages qui en temps ordinaire ne donnent aucun

(1) La théorie de M. Faye, accréditée en Italie, a donné lieu à la publication d'un traité de météorologie par Diamilla Muller : *Le Leggi delle tempeste (secondo la theoria di Faye)*.

indice de tension électrique sont fortement chargés d'électricité pendant l'orage;

2° Dans ces mêmes nuages, situés à une altitude de 1200 *m.* à laquelle règne une température bien supérieure à 0°, il se forme incessamment des masses de glace énormes et pour ainsi dire inépuisables;

3° Enfin les orages ne sont pas stationnaires, ils ne se dissipent pas par épuisement, mais ils voyagent avec une vitesse de 10, 20 lieues à l'heure. Les nuages à grêle qui n'ont qu'une étendue fort restreinte, passent au-dessus d'un lieu en quelques minutes, l'averse de grêle ne dure jamais plus d'un quart d'heure, mais ne cesse pas de tomber et couvre dans sa course une longue bande de terrain.

Selon M. Faye, on ne doit pas chercher dans les basses régions de l'atmosphère le principe orageux, car là il y a calme, chaleur, tension électrique à peu près nulle; c'est au contraire dans les régions élevées, là enfin où l'on trouve le froid, l'électricité, le mouvement.

Il démontre ensuite par quel mécanisme naturel cette électricité, ce froid et ce mouvement peuvent être amenés dans les couches inférieures des nimbus et il fait intervenir à cet effet les gyrations à axe vertical qui se produisent si souvent dans les fluides en mouvement.

« Ces gyrations, en effet, sont des phénomènes réguliers qui naissent dans les courants horizontaux; ces tourbillons coniques ont une tendance à se propager vers le bas, d'autant plus marquée, que les gyrations y sont plus violentes et en même temps qu'ils percent les couches inférieures de leurs pointes, ils voyagent par en haut avec le courant supérieur où ils ont pris naissance.

« Ces mouvements tourbillonnaires entraînent en bas tous les matériaux, charriés par ces courants supérieurs...

Les aiguilles de glace s'agglomèrent de façon à former des noyaux opaques, ceux-ci, trouvant dans les nuées inférieures de l'eau vésiculaire, la congèlent en une mince couche transparente.

« Si dans ce mouvement tourbillonnaire où les spires de rayons variés, centrés sur le même axe, ont toutes sortes de vitesses, ces petits grêlons passent successivement dans les régions occupées par l'air glacial venu d'en haut et dans d'autres remplies de vapeurs vésiculaires, ils croîtront en volume par couches successives jusqu'à ce qu'ils échappent par leur poids ou par l'effet de la force centrifuge à l'action du tourbillon... » (1).

Ce tourbillon amènerait aussi vers le bas une forte tension électrique et l'électricité comme on le voit ne jouerait dans ce phénomène qu'un rôle secondaire.

M. Faye reconnaît lui-même qu'il est très difficile de constater *de visu* le mouvement tourbillonnaire à spires horizontales qui soutient les grêlons dans le nimbus, car, du sol, le nuage opaque nous cache le mécanisme; quant aux observations de montagnes au milieu de la nuée orageuse, elles sont dangereuses et par suite sont rares.

Le savant météorologiste cite cependant à l'appui de sa théorie les observations faites par M. Lecoq au sommet du Puy-de-Dôme en 1836 : «... Je voyais la grêle se précipiter des nuages inférieurs et tomber sur le sol... Le nuage qui la laissait épancher avait des bords dentelés et offrait dans ses bords mêmes un mouvement tourbillonnaire difficile à décrire... Il semblait que chaque grêlon fût chassé par une répulsion électrique, les uns s'échappaient par-dessous, d'autres sortaient par-dessus... » (2).

(1) *Comptes rendus de l'Acad. des Sciences* pour 1875, T. II, p. 384.
(2) *Comptes rendus de l'Acad. des Sciences,* pour 1836, T. II, p. 324.

M. Severtzow se range aussi à l'avis de M. Faye. Témoin d'un orage de grêle en Asie, dans le Thian-Chan occidental, à une altitude de 1500 *m.* il a vu le nuage orageux descendre et le tourbillonnement commencer.

Répétons que ces observations sur les montagnes ne peuvent jamais être complètement exactes, car elles sont troublées par l'orage, le danger qui en résulte, les tourbillonnements continuels quelle que soit leur marche, et il est pour ainsi dire impossible d'obtenir des appréciations de sang-froid dans de telles conditions. De plus si, comme le fait très bien remarquer M. Faye, d'après une note du commandant Rozet, chargé en 1848 d'opérations géodésiques dans les Pyrénées, on est souvent trompé par le mouvement des nuages et que l'on prenne pour des courants ascendants des courants descendants, on peut retourner le sens de cette observation et dire aussi que l'on prend des courants descendants pour des courants ascendants. M. Mascart confirme cette conclusion quand il dit que cette apparence des courants descendants peut s'expliquer par le refroidissement des courants ascendants et par une condensation progressive de la vapeur d'eau qui se propage de haut en bas.

La discussion continue entre les partisans des courants ascendants et ceux des courants descendants, les premiers représentés par M. Mascart, les seconds par M. Faye. Nous ne les suivrons pas, leurs savantes digressions n'éclairciraient pas notre sujet ; retenons-en seulement cette déclaration de M. Faye, à savoir que les courants descendants *seuls* amènent vers le bas l'électricité des hautes régions, et il s'appuie, pour cela, sur la loi de l'accroissement de cette électricité proportionnellement à l'altitude. Ce fait est évidemment démontré par les expériences de Gay-Lussac,

de Saussure, d'Ermann, de Becquerel (1). Mais il en résulte aussi que cet accroissement proportionnel, à peu près régulier en temps serein, subit de notables variations avec la formation des cirro-cumulus et des nimbus. Il ne semble donc plus nécessaire de faire intervenir un mouvement tourbillonnaire pour amener l'électricité des hautes régions ; l'humidité, la condensation des vapeurs suffit pour établir un contact et ouvrir un chemin à cette électricité qui s'accumule peu à peu dans les couches inférieures, où elle est maintenue à grande pression par l'interposition des couches sèches et chaudes qui séparent les nimbus du sol. C'est aussi l'opinion de M. Palmieri, fondée sur les expériences qu'il a pu faire à Naples, à l'observatoire de Capodimonte et à celui du Vésuve ; les rapports de M. Colladon concluent de même.

Quant au mouvement que M. Faye fait provenir de tourbillons coniques, et il peut être en effet produit par eux, mais aussi et le plus souvent par des mouvements de translation résultant de causes multiples : origine des vents, évaporation, dépression, inégalités de température... Sinon on aurait toujours des gyrations et cependant les cyclones ne sont pas les résultats nécessaires des orages.

Bien plus, M. Boussingault a vu des orages de grêle se former et des grêlons tomber dans une atmosphère calme.

Enfin, M. Colladon, un de ceux qui combattent le plus vivement la théorie de M. Faye, la réfute en ces termes : « Les observations nombreuses que j'ai poursuivies depuis soixante ans m'obligent à admettre qu'à côté de ces grands orages engendrés par des mouvements gyratoires atmosphériques se transportant rapidement d'un lieu à un autre,

(1) Voir p. 67.

on peut citer des cas nombreux où la nuée orageuse reste longtemps stationnaire et où l'appel de la couche d'air supérieure est dû essentiellement à une averse, seule cause apparente du renouvellement de l'électricité des orages, quelquefois aussi de la congélation de leurs gouttes de pluie en grêlons. »

Comme on le voit, la solution proposée par M. Faye est loin d'obtenir une adhésion complète. Après lui, d'autres systèmes secondaires viennent s'efforcer d'écarter encore l'électricité. Puis la théorie de Volta reparaît modifiée par M. Colladon; enfin Planté, d'après ses curieuses expériences, nous explique toutes les manifestations de l'orage de grêle par la seule puissance électrique.

M. Faye a fait école : toutes les théories qui se groupent autour de la sienne forment une série de systèmes dans lesquels l'électricité n'est qu'un effet de l'orage et ne contribue en rien à la formation des grêlons ; mais elles ne sont pas appuyées sur les bases sérieuses et les arguments souvent irréfutables qui irritent et déconcertent les adversaires des courants descendants.

Si M. Cousté n'a pas tenté de renverser directement les propositions de M. Faye, il espère y arriver par un moyen détourné : il en prend la contre-partie. Si la grêle a encore pour organe principal une trombe, un tourbillon conique, le sens de cette trombe est ascendant ; puis il emprunte à Volta le principe de l'évaporation par la chaleur diurne, et il faut avouer que ce choix n'est pas heureux, puisque, sur ce point, l'erreur du célèbre italien a été prouvée. Quoi qu'il en soit, d'après M. Cousté, la chaleur solaire vaporise l'eau vésiculaire d'un nuage inférieur qu'il appelle *nuage à grêle* ; ces vésicules sont transportées par le mouvement ascensionnel de

la trombe dans les hautes et froides régions atmosphériques où les globules se trouvent réduits en particules glacées. Il suppose donc la présence de trois couches de nuages superposés : le nuage à grêle chargé d'eau vésiculaire, le second nuage plus élevé, générateur de la trombe et le nuage froid qui contient de la glace et de l'eau en surfusion. Le courant de la trombe transporte alternativement les noyaux congelés du nuage glacé au nuage intermédiaire : de là, l'accroissement de grêlons par couches concentriques. C'est donc, comme il le dit lui-même, un phénomène essentiellement dynamique et physique, ayant pour seul agent nécessaire, la chaleur. M. Cousté nous explique pourquoi la grêle règne toujours dans les régions tempérées : « ...parce que d'une part il lui faut le concours d'une trombe puissante et que la trombe naît de l'action des rayons solaires sur les parties culminantes du nuage à grêle et que cette action est nulle lorsque les rayons sont voisins de la verticale (le nuage à grêle est alors abrité par les nuages supérieurs) et que cette même action est trop faible lorsque les rayons sont trop voisins de l'horizontale... Les mêmes motifs font que la grêle ne se produit guère que dans le jour et dans la saison la plus chaude » (1).

Il termine en disant que l'électricité n'a pas d'influence essentielle.

MM. Oltramare et Renou insistent sur le soi-disant état de surfusion auquel un nuage pourrait être amené doucement sans le moindre mouvement interne, jusqu'à une température exceptionnelle de — 26° de manière à ce que les gouttelettes qui le composent restent à l'état liquide. L'électricité n'est même pas mentionnée dans la théorie de

(1) *Comptes rendus de l'Acad. des Sciences pour 1875*, T. II, p. 880.

M. Renou. Quant à M. Oltramare, au contraire, nous savons qu'il attribue à l'électricité la suspension, dans l'atmosphère, des gouttelettes d'eau qui composent les nuages (1). Cette électricité tend à isoler les molécules et à maintenir leurs distances réciproques et si la surfusion existe à — 14° par exemple, une décharge électrique produira un rapprochement brusque des gouttelettes encore liquides, qui se congèleront alors en glaçons (2). M. Faye réfute ces hypothèses et nous montre qu'un tel état d'équilibre instable ne s'obtient en laboratoire qu'au moyen de précautions infinies et que de telles conditions ne peuvent se rencontrer dans l'atmosphère.

Enfin, suivant M. Plumandon, le noyau glacé vient des hautes régions : d'abord très petit, il tombe lentement et se développe en tombant. Si, par exemple, on considère une hauteur de 2,000 *m.*, le temps de la chute sera environ de dix minutes pour les grains de un centimètre de diamètre. Cette théorie charmerait par son extrême simplicité si elle était d'accord avec les phénomènes observés, mais elle ne s'en préoccupe nullement et M. Plumandon ajoute lui-même qu'il ne s'explique pas la production d'éclairs dans une atmosphère uniformément humide et homogène au point de vue de la conductibilité électrique.

Revenons à M. Colladon qui, tout en opposant des réfutations aux précédentes théories, n'a cessé de rappeler les grandes manifestations électriques ; il s'en inspire et soutenu par les multiples observations sans cesse recueillies, il développe un raisonnement plus vraisemblable.

M. Colladon rappelle d'abord la proposition de M. Lu-

(1) Voir page 75.

(2) *Comptes rendus de l'Acad. des Sciences pour 1879*. T. I, p. 819.

vini qui, conformément aux expériences de Faraday sur l'électrisation de la glace par le frottement de l'air humide, fait intervenir cette cause dans le renouvellement de l'électricité atmosphérique (1). Mais en acceptant cette idée, il fait justement remarquer que cette production ne peut avoir lieu sans supposer une violente agitation de l'air et par suite son renouvellement continuel. C'est pourquoi, étant donné le cas fréquent en été de nuages condensés, un appel de l'air des zones supérieures se produira à la suite d'une averse et ce courant apportera avec lui une provision constante d'électricité positive, d'aiguilles de glace, des cirrus et de petits globules d'eau à l'état de surfusion. Ce mélange sera donc suffisant pour contrebalancer le réchauffement de l'air produit par la condensation des nuages et la température des masses pluvieuses ; et cette température finira par s'abaisser facilement au-dessous de 0°.

M. Colladon se sert de ces considérations pour expliquer : 1° le renouvellement de l'électricité atmosphérique ; 2° la formation accidentelle du grésil et des grêlons qui apparaissent pendant les mois de la saison estivale lorsque les nuées ont leur maximum de densité et d'élévation. Puis il reprend certaines données de Volta sur l'accroissement des grêlons et leur suspension dans l'atmosphère, mais leur fait subir de notables modifications.

Il nous dit d'abord que pendant l'orage du 8 juillet 1875 à Genève : « La haute nuée en apparence continue qui versait sans interruption une épaisse colonne de grêlons ne s'illuminait presque jamais en entier par un seul éclair. Les lueurs paraissaient restreintes, saccadées ; leur rapide succession imitait assez bien des séries de cascades lumi-

(1) Voir p. 97.

neuses dans l'intérieur de ce groupe dont chaque partie s'illuminait comme à tour de rôle, à des intervalles variant approximativement de 1/3 à 1/10 de seconde » (1).

M. Charcossey de Roanne vient confirmer cette observation quand il écrit à M. Colladon : « les nuages paraissaient immobiles, leur teinte était grisâtre par place, phosphorescente ailleurs ; quand tout à coup ils semblèrent s'illuminer à l'une de leurs extrémités ; des éclairs en jaillirent avec une grande intensité. Un instant après un second foyer se déclarait dans une autre partie de la masse. Sous le feu continu des éclairs qui s'en échappaient un troisième foyer vint à s'ouvrir formant avec les deux premiers un triangle presque régulier » (2).

M. Colladon s'appuie sur ce fait et sur d'autres analogues pour conclure que certaines nuées orageuses, composées en apparence d'une seule masse condensée, sont en réalité des groupes distincts formés de portions isolées les unes des autres, quant à leur état électrique, par des couches d'air sec et froid appelées de l'atmosphère supérieure (3). Ces groupes qui contiennent, comme nous l'avons vu, les uns de l'eau vésiculaire à une température inférieure à 0° et encore à l'état liquide, les autres des aiguilles de glace, forment autant de centres d'attraction fortement électrises, soit positivement, soit négativement, entre lesquels les noyaux congelés sont successivement ballottés. Pendant ces multiples oscillations, ils s'enveloppent alternativement de gouttes d'eau glacée et de cristaux de glace, leur

(1) *Comptes rendus de l'Acad. des Sciences pour 1875*, T. II, p. 880.

(2) *Comptes rendus de l'Acad. des Sciences pour 1875*, T. II, p. 445.

(3) Voir p. 126 et 128.

poids augmente, et cet accroissement ralentit la vitesse des oscillations qui cessent lorsque la tension électrique n'est plus assez forte pour attirer les grêlons. M. Colladon nous fait remarquer en outre que la forme des grêlons varie suivant le sens de ces oscillations. Si, par exemple, plusieurs d'entre eux sont animés d'un mouvement gyratoire à la manière d'un tourniquet électrique, ils grossiront plus rapidement dans le sens du rayon de rotation et finiront par acquérir une forme plate et lenticulaire (fig. 60).

Cette théorie semble se rapprocher, plus que les précédentes, des observations constatées et par suite de la vérité. M. Colladon ne repousse pas entièrement les idées de M. Faye au sujet du froid et du mouvement appelé des couches supérieures de l'atmosphère, mais il lui conteste le droit de généraliser l'hypothèse d'un tourbillon conique descendant et de présenter cette cause comme la seule capable d'engendrer ces orages. Il rend enfin à l'électricité la place qui lui est due et que les partisans de l'agent mécanique veulent lui enlever.

Terminons cette énumération des systèmes sur la grêle en rapprochant l'une de l'autre les expériences de deux savants, Bertholon et Gaston Planté que sépare plus d'un siècle de travail et de progrès.

« En bonne physique comme en chimie, dit Bertholon, il faut produire les phénomènes que l'on veut expliquer... »

« On place, un vase de cristal rempli d'eau dans un bain d'eau froide à 18°. M. Quinquet y décharge une quantité de matière électrique que sur le champ il soutire pour restituer au réservoir commun, c'est-à-dire au bain d'eau froide ; en sorte que la matière électrique n'a fait que passer au travers de l'eau du vase. C'est ce pas-

sage subit du fluide électrique dans l'eau qui en opère la conversion en grêlon. »

« C'est de la pluie qu'on obtiendra au lieu de grêle si l'expérience se fait par une température moyenne. M. Quinquet imbibe d'eau à cet effet une corde de coton, ce qui représente l'eau soutenue dans le nuage, il soumet cette corde au fluide électrique et au moment où il a déchargé la surabondance de la matière électrique sur ce nuage artificiel, le coton se resserre et exprime son eau sous forme de pluie. Pour imiter le givre, il fait passer de l'eau réduite en vapeur dans un récipient exposé dans le bain froid à 18° : à l'instant, l'intérieur du récipient a été couvert de givre... Sur treize expériences, pour la conversion de l'eau en grêle, ajoute Bertholon, il n'y en a que deux qui aient complètement réussi ; il en est peut-être de même et fort heureusement dans la nature, c'est-à-dire qu'il y a pour elle, comme pour le physicien, un mode difficile à saisir dans cette restitution de la matière électrique d'un nuage à un autre » (1).

Voici maintenant les savantes expériences de Gaston Planté et les déductions qu'il en a tirées :

1° Si l'on plonge le fil négatif d'une batterie de 400 éléments secondaires dans un liquide conducteur, de l'eau salée par exemple, et que l'on approche l'électrode positive de la surface du liquide, on voit se former, au milieu d'éclats lumineux, une série de globules ovoïdes qui sont lancés avec une extrême rapidité à plus d'un mètre du lieu de l'expérience (fig. 66) ;

2° Si, au lieu d'une couche profonde de liquide, le courant ne rencontre qu'une surface humide telle que le fond incliné d'une cuvette, les effets calorifiques et lumineux

(1) *De l'Electricité des Météores*, Bertholon, T. II, p. 202

augmentent, il y a production immédiate de vapeur ; le phénomène est alors accompagné d'une auréole brillante (fig. 67),

Planté en déduit directement cette première proposition, à savoir que : des décharges électriques éclatant au milieu d'un nuage peuvent, suivant son état de condensation, le vaporiser ou produire la formation instantanée de bombes liquides d'un volume considérable qui sont projetées à des hauteurs où la température est notablement plus basse que celle du nimbus qu'elles viennent de quitter (fig. 68). Ces

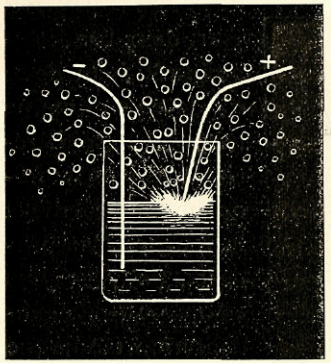

Fig. 66.

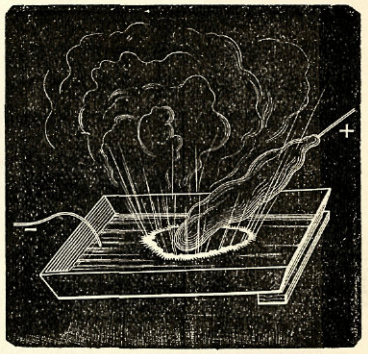

Fig. 67.

globules sont donc immédiatement congelés et présentent l'aspect de grêlons à structure rayonnante.

Il attribue aussi l'accroissement de certains grêlons à couches concentriques, à des mouvements gyratoires ; mais il fait provenir ces mouvements gyratoires de l'électricité atmosphérique, dont l'action serait combinée avec celle du magnétisme terrestre, c'est-à-dire à la rotation de courants électriques de l'atmosphère, auxquels les nuages servent de conducteurs mobiles et dont le mouvement se communique aux masses d'air qui les entourent.

La phosphorescence électrique de grêlons observés par M. Colladon trouve aussi son explication dans les expériences ci-dessus énoncées.

Enfin aucune des particularités des orages de grêle n'échappe à Gaston Planté qui nous les présente éclaircies, prévues pour ainsi dire :

La chute de la grêle en bandes étroites s'explique facilement dans cette théorie par la vaporisation et la congélation de l'eau autour des sillons tracés par les éclairs toujours plus développés en longueur qu'en largeur. Les bandes de pluie comprises entre deux bandes de grêle résultent de ce que la masse interne du nuage froid, réchauffée par la fréquence des éclairs et la vapeur d'eau produite, ne peut plus en opérer que la condensation, tandis que la congélation a lieu sur ses bords.

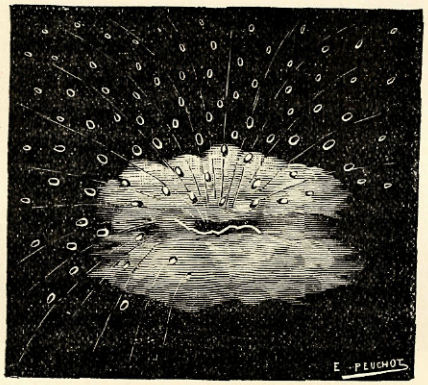

Fig. 68.

Le bruissement qui précède ou accompagne la chute de la grêle est dû, comme celui qui se produit dans le voltamètre, à la pénétration du feu électrique dans le nuage et à l'émission rapide de la vapeur,

Les éclairs, avec ou sans tonnerre, qui accompagnent les orages à grêle proviennent de ce que, dans cette collision entre deux masses humides et d'une grande mobilité de formes, c'est tantôt l'une qui pénètre plus ou moins profondément l'autre, de même que dans le voltamètre, parmi

les traits de feu qui s'élancent du pôle positif, les uns sont silencieux et les autres suivis d'étincelles bruyantes au pôle négatif, suivant que l'une ou l'autre des électrodes plonge plus ou moins dans le liquide.

Les intermittences et recrudescences qu'on observe dans la chute de la grêle à la suite des éclairs sont encore analogues à celle du voltamètre. Quand le nuage électrisé a réduit en vapeur une portion de cirrus dans lequel il pénètre, il se passe un instant avant qu'il ne rencontre une nouvelle masse à vaporiser, mais le reste du cirrus comble aussitôt le vide formé, une nouvelle décharge se produit, par suite une nouvelle vaporisation et formation de grêlons (1).

Planté ne veut pas repousser entièrement l'idée des mouvements tourbillonnaires (résultats de deux courants opposés ou de même sens et alors de vitesse inégale), mais il réserve, même dans ce cas, un rôle important à l'électricité.

En résumé, si l'on rejette au rang de simples conjectures les suppositions de MM. Plumandon, Pouillet, Oltramare, Renou, Cousté..., il reste en présence les théories de Faye, Colladon et Planté. Nous ne voulons pas en imposer une ou la faire accepter de préférence aux autres, mais il est cependant permis de faire remarquer que si les tourbillons coniques à axe vertical sont incontestablement l'origine de quelques orages, nous avons vu dans le chapitre des orages et nous verrons plus loin dans celui des trombes qu'il est difficile de transformer cette cause accidentelle en loi constante productive d'effets si variés sans y introduire comme facteur important l'électricité atmosphérique ou terrestre.

Les raisonnements de M. Colladon, appuyés sur les observations consciencieuses et détaillées qu'il a toujours

(1) *Comptes rendus de l'Acad. des Sciences* pour 1875, T. II, p. 616.

poursuivies, séduisent davantage, mais on sent qu'il manque en quelque sorte une base à cette théorie ; quelle est la cause de l'appel de l'air des hautes régions ? Il l'attribue, il est vrai à la dépression que produit une averse, mais cette première action n'est pas nettement définie et il faut remarquer d'ailleurs que la pluie ne précède pas les averses de grêle ; elle les suit au contraire, le plus souvent ; on ne voit donc pas le principe générateur de l'orage (1).

Au contraire dans la théorie de Planté, le mécanisme de l'orage est bien réglé et l'accroissement des grêlons lui-même nous est clairement expliqué ; il n'y a plus besoin de recourir aux attractions électriques. D'après Planté, les grêlons sont soutenus dans les nuées par des tourbillons produits sous l'influence du magnétisme terrestre (analogies qu'il a tirées de son expérience des *spirales électrodynamiques*) (2) et il pense que la production de leurs couches alternativement opaques et transparentes est due à des vaporisations et à des congélations successives jointes au mouvement gyratoire. Le premier noyau neigeux étant formé. « ... la gyration au sein de l'humidité du nuage produit autour une couche de glace formée plus lentement et par conséquent transparente. A la suite d'une nouvelle décharge électrique, une autre émission de vapeur a lieu, et en même temps qu'il en résulte de nouveaux grêlons ; ceux qui tournent encore peuvent se recouvrir d'une seconde couche de vapeur qui se congèle brusquement à l'état neigeux et ainsi de suite... » (3).

Il est possible et même probable que toutes ces causes collaborent à la formation de la grêle et que, suivant la

(1) Voir p. 128.
(2) Voir p. 81.
(3) *Phénomènes électriques de l'atmosphère*, Gaston Planté p. 99, 1888.

structure des grêlons, tel ou tel mécanisme a présidé à leur génération : mouvements tourbillonnaires et gyratoires, attractions électriques et projections dans les zones supérieures, congélations instantanées ou accroissement progressifs, tous ces prénomènes doivent nécessairement se produire, mais on peut affirmer à coup sûr avec MM. Colladon et Planté que, dans tous ces cas, l'agent électrique ne reste pas inactif et que par sa toute puissante action il produit une partie si ce n'est l'ensemble de tous ces multiples effets.

L'idée de l'électricité comme cause principale des orages de grêle est tellement vulgarisée, que l'on a cherché à se garantir du fléau par des appareils propres à faire écouler le fluide dans le sol : les *paragrêles* n'ont pas donné les résultats attendus, mais la fausseté de la croyance populaire n'est pas, pour cela, démontrée. En effet, les tiges métalliques de 6 mètres de haut que l'on plantait au milieu d'un champ, les ballons ou les cerfs-volants armés de pointes de fer ou de cuivre, ne pouvaient jouer que le rôle de simple conducteur dont le cercle de protection n'était pas plus étendu que celui d'un paratonnerre de cette hauteur. Aucun de ces appareils isolés n'était capable d'aller au sein du nuage orageux lui soutirer son flux d'électricité et l'empêcher d'engendrer la grêle : leur inutilité ayant été pleinement reconnue, on y a renoncé.

Les recherches doivent donc se tourner d'un autre côté. Si, comme nous le fait remarquer M. Becquerel, les plaines limitrophes des forêts sont épargnées (et c'est encore une preuve de la présence de l'électricité, car on sait que l'écoulement du fluide par les arbres se fait continuellement) ne serait-ce pas un argument de plus en faveur de la conservation et même de la création des massifs boisés ?

M. Lespiault nous apprend, d'autre part, que les vallées sont frappées de préférence aux côteaux et aux plateaux voisins. Cela lui semble indiquer que la grêle a besoin d'une certaine profondeur pour se former. Arago avait cru le remarquer et M. Colladon pensait d'abord que les cours d'eau devaient avoir une certaine influence sur la direction et le développement des orages de grêle ; puis il n'ose rien affirmer. Ces vagues données malheureusement ne suffisent pas, et de plus il faut bien convenir que sans avoir des bois ou des rivières à proximité, certaines régions ne semblent que très peu intéressées, à la recherche d'un paragrêle efficace ; il en est en effet qui n'ont jamais été grêlées Les compagnies d'assurances savent fort bien que tel champ est régulièrement éprouvé de préférence à tel autre qui ne l'est jamais : les primes sont payées en conséquence. Quelle est la cause de cette bizarrerie qui n'est certainement pas une capricieuse inégalité ?

Faut-il en conclure à la nécessité d'étudier la composition géologique de ces terrains au point de vue de la conductibilité électrique?

Nous le croyons, mais toutes ces questions auxquelles on ne peut actuellement répondre d'une manière certaine, demandent de savantes recherches qui auront pour but immédiatement pratique de sauver les récoltes et par suite de préserver nos campagnes d'une ruine souvent complète.

CHAPITRE V

TROMBES, TORNADES, CYCLONES

L'étude des grands mouvements tournants de l'atmosphère doit être considérée comme la question la plus importante de la météorologie. Elle comprend les cyclones, les tornades et les trombes.

Les cyclones naissent près de la ligne équatoriale, ils exercent leurs ravages dans le même hémisphère qui les a engendrés, et leur marche, pour ainsi dire invariable, peut être déterminée à coup sûr ; après avoir décrit une parabole, ils s'en viennent mourir sur nos côtes où les orages et les tempêtes n'en sont plus que le pâle reflet et peuvent être regardés comme le dernier soupir des furieux ouragans tropicaux.

A côté de ces grands centres cycloniques, il faut remarquer la formation de phénomènes analogues, des tornades et des trombes qui sont comme la miniature des premiers, mais qui dans leurs dimensions restreintes n'en sont pas moins terribles ; ils préfèrent aussi les régions équatoriales, mais dans nos climats tempérés, pendant les chaudes

journées d'été, il se produit encore des tourbillons qui engendrent ordinairement la grêle et quelquefois des trombes.

On voit que selon les latitudes et suivant les saisons, l'atmosphère est constamment agitée par ces diverses perturbations : orages, grêle, trombes, tornades, cyclones, ouragans de toutes sortes ; un lien étroit unit ces phénomènes qui dérivent les uns des autres et qui souvent sont confondus dans une seule manifestation. Cette intimité, cette dépendance complète montre bien qu'ils naissent d'une même cause, d'un seul principe et que les effets seuls diffèrent dans leurs détails.

Quel est donc ce principe ?

Plus nous avançons dans notre travail, plus les ressemblances s'accentuent, plus les coïncidences se multiplient et nous voyons plus clairement le rôle de l'électricité. Ne sera-t-on pas amené à penser que ces grands courants électriques qui sillonnent la terre et l'atmosphère réagissent les uns sur les autres et que ces réactions deviennent ainsi la cause de mouvements tourbillonnaires et par conséquent que l'électricité est le principe cherché de toutes ces perturbations atmosphériques ?

I

TROMBES

Si les anciens ont décrit les trombes, aucune de leurs définitions ne peut nous éclairer et ce n'est qu'à titre de curiosité historique que l'on doit lire ou citer Senèque, Aristote, Pline et Lucrèce. Quelques-uns ont cependant résumé leurs observations en termes presque scientifiques. Ils parlent de colonnes qui descendent du ciel sur la surface de la mer ou bien qui s'élèvent en un long tuyau pour aller rejoindre le nuage qui les aspire ; mais la plupart racontent un ouragan, un tourbillon, une trombe à l'aide d'images poétiques ou sous la forme d'allégories ; dans leurs récits, chaque phénomène est un dieu et prend un nom sous lequel il reçoit les invocations des mortels terrifiés.

Pour les savants du XVII[e] siècle, une trombe ou une *trompe*, comme on l'écrivait quelquefois, n'était qu'une manifestation particulière du vent et on confondait souvent les trombes terrestres avec les ouragans, sans les distinguer des diverses perturbations qui accompagnent un orage. Dès qu'ils la connaissent : c'est un nuage épais, chargé d'exhalaisons et de vapeurs qui vient à tomber obliquement et qui poussé par une force extraordinaire, s'abat avec rapidité suivant l'impulsion qu'il a reçue, en renversant les arbres et les maisons qui se trouvent sur

son passage. Les trombes marines proviennent aussi de la même cause et : « quand les mariniers aperçoivent le péril, ils tirent quelques coups de canon chargés de barres de fer afin d'éloigner par l'impulsion de l'air la colonne redoutable ou de la couper et de la dissiper en dissipant l'eau qui la compose » (1). On fut ensuite frappé de l'analogie que présentait la structure des trombes avec celle des colonnes de fumée et de laves qui s'échappent d'un volcan en activité et toutes les deux étant sillonnées souvent d'éclairs on donna aux trombes comme principe, les fermentations souterraines : « Ce sont des colonnes de fumée qui sortent de la mer, on voit d'abord l'eau bouillonner, puis une fumée noire s'élance et s'élève avec un bruit sourd comme celui d'un torrent ; s'il se rencontre un vaisseau, la violence de la colonne obscure brise les voiles. Quelquefois, elle soulève le vaisseau même qui retombe par son poids, et son mouvement accéléré dans la chute, l'ensevelit dans les eaux tandis que la colonne continue de s'élever en tournant rapidement et va se perdre dans les nuées » (2).

A partir de cette époque, les études deviennent plus complètes, grâce à des observations détaillées et de là naissent diverses théories que la discussion a sans cesse multipliées; mais avant de les examiner nous allons rendre compte, à l'aide de quelques descriptions, des trombes terrestres et des trombes marines.

(1) *Journal des Savants*, 1682, p. 205.

(2) *Mémoires de l'Acad. des Sciences*, 1727, p. 5 et *Leçons de Physique*, Regnault, T. III, p. 98.

I. Principaux caractères des Trombes.

1° Les mêmes conditions atmosphériques nécessaires à la formation d'un orage semblent présider en apparence à l'apparition des trombes terrestres ; l'orage commence, il

Fig. 69.

est effrayant dans sa force, le nimbus a des teintes encore plus sombres, l'obscurité est presque complète, les éclairs se succèdent sans interruption et les roulements du tonnerre, répercutés par tous les échos ne s'affaiblissent que pour recommencer plus intenses. Tout d'un coup, des tourbillonnements agitent le centre du nimbus qui s'abaisse

sous la forme d'un cône renversé dont la pointe s'effile toujours davantage et qui enfin touche le sol et le creuse dans un rapide mouvement gyratoire (fig. 69). Enveloppée dans des vapeurs blanchâtres dont les gyrations semblent remonter vers la nue, la trombe s'élance avec un bruit terrible, car à son mouvement de rotation s'ajoute un

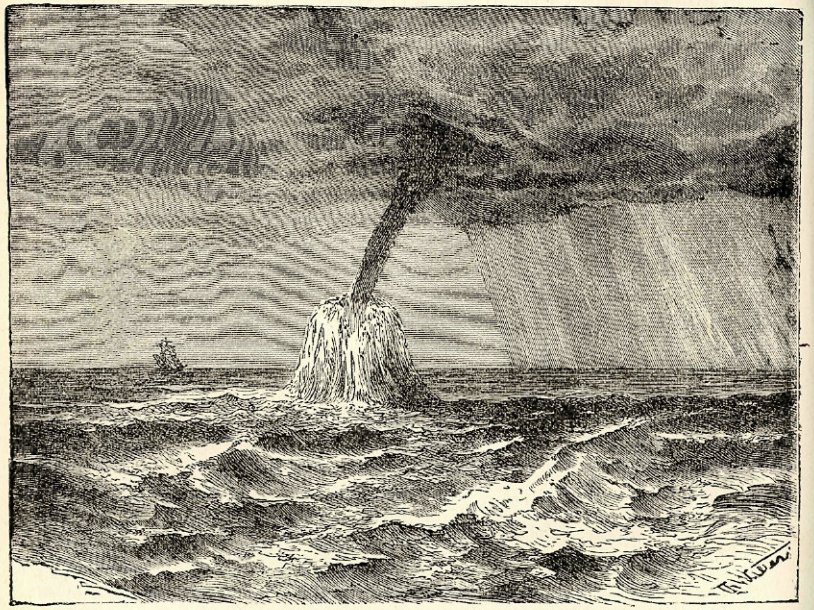

Fig. 70.

mouvement de translation qui la porte en avant. Sur son passage, tout est broyé, les maisons s'écroulent, les arbres sont déracinés, déchiquetés et jetés en lambeaux à des distances incroyables. Des éclairs jaillissent, des globes de feu s'échappent de la colonne dévastatrice, frappent de tous côtés et ajoutent encore aux ravages de la trombe

leurs effets foudroyants. Puis, peu à peu, sa force s'épuise, elle ralentit sa marche, elle se dissipe en partie, flotte encore indécise et disparaît dans un dernier éclair pour remonter vers la nue qui déverse des flots de grêle et de pluie.

2° Les trombes marines commencent souvent de la même manière que les trombes terrestres, mais souvent aussi on les voit apparaître par un temps calme et un ciel peu couvert. Aussitôt que le cône de vapeurs est à une certaine distance de la mer, l'eau tourbillonne, écume, bouillonne et se soulève en une sorte de monticule d'où jaillit une colonne d'eau qui s'en va en tournoyant non-seulement rejoindre le cône vaporeux, mais encore semble se transporter jusqu'aux nuages (fig. 70). D'après Dampierre, ce transport existe réellement « puisque, dit-il, le nuage s'accroît alors en volume, en densité et en obscurité » (1).

Plusieurs trombes marines peuvent se former simultanément; nous relevons dans l'ouvrage de Peltier la relation suivante faite le 19 avril 1827 par Scoresby pendant une traversée de New-York en Angleterre : « ...Les nuages qui nous enveloppaient de toutes parts étaient si noirs et si épais que l'obscurité régnait au milieu de nous. Il faisait cependant assez clair pour que nous puissions distinguer tous les détails de l'affreuse scène qui se passait sur le bâtiment. La pluie tombait par torrents, mêlée à des grêlons aussi gros que des noisettes. Des éclairs brillaient de tous côtés, accompagnés presque au même instant de coups de tonnerre. La mer était agitée d'une manière violente et irrégulière et présentait un aspect remarquable... D'immenses nuages de vapeur s'élevaient de sa surface et formaient

(1) *Voyage autour du Monde*, Dampierre. — *De l'Electricité des Météores*, Bertholon, T. II, p. 215.

dans l'air une multitude de colonnes grisâtres : on eût dit d'innombrables piliers supportant la voûte massive des nuages qui couvraient le navire » (1). Puis les trombes se dissipent, mais quelque temps après, les nuages s'amoncellent de nouveau et le paratonnerre du navire est foudroyé par un éclair qui fit paraître le bâtiment tout en feu. « Concentré par le conducteur dans un seul courant, le feu électrique se dispersait aussitôt qu'il pénétrait dans la mer, mais une vapeur lumineuse paraissait remonter de la mer jusqu'aux nuages ».

Les exemples de trombes marines formées en temps calme sont des plus nombreux. Le capitaine Wakefield vit, à Gibraltar, « tomber une trombe à côté de son vaisseau, sans qu'il ait été possible de la prévoir » (2). Perkins assurait le 8 juin 1756, à la Société royale de Londres, qu'il n'y avait aucune manifestation de vent dans les trombes, d'après les observations de Howard et de Spring à Malacca et de Melling et Langtoff aux Indes. Piddington en signale également de nombreuses ; et les trombes d'Antibes en 1876 et de Toulouse en 1881, se sont formées dans un calme presque complet.

Certaines des trombes marines, au lieu de commencer par en haut semblent s'élancer de la mer et le lieutenant de vaisseau Leps, commandant le *Vautour*, vit dans le golfe de Bougie, le 1er octobre 1846, l'eau jaillir à une hauteur considérable, puis aller faire sa jonction avec un gros nuage noir. Spoletti en remarqua de semblables dans l'Adriatique ; tous les auteurs en donnent de fréquents exemples et Coulvier-Gravier dit aussi : « que quelques

(1) *Des Trombes*, Peltier, p. 118, Paris, 1840.
(2) *De l'Electricité des Météores*, Bertholon, T. II, p. 215.

trombes prennent naissance au ras de terre ou sur les ondes pour s'élever dans l'air » (1).

Si les trombes marines, qui sont en général peu dangereuses en elles-mêmes, se trouvent à proximité des côtes, elles se transforment en trombes terrestres et deviennent ainsi redoutables. Henry Piddington en cite des cas observés dans le golfe de Bougie en 1843 et la grande trombe qui dévasta l'île de Ténériffe en novembre 1826 avait toutes les apparences d'une trombe marine. Elle déversa d'énormes volumes d'eau sur l'île en traçant de profondes ravines dans le sol, pendant qu'on voyait à la mer et sur terre de nombreux globes de feu et qu'un cyclone soufflait au large (2).

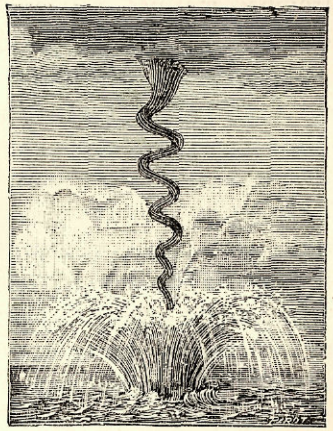

Fig. 71.

Les trombes marines ou terrestres ne sont presque jamais complètement verticales ; elles décrivent une courbe qui se transforme quelquefois en un S plus ou moins accentué, et elles peuvent prendre enfin l'aspect d'une spirale. Une trombe de ce genre fut observée à Nice le 6 janvier 1789 (3), (fig. 71).

D'après le rapport de M. Meunier, les trombes du 27 avril 1879 à Vitry-sur-Seine affectaient la forme d'un

(1) *Recherches sur les Météores*, Coulvier-Gravier, p. 123.
(2) *Trombes et Cyclones*, Zurcher et Margollé, p. 98.
(3) *Observations et recherches sur les Trombes*, Peltier, p. 249.

ruban cylindrique et étaient contournées à la façon d'un S très lâche (1).

On vit à Noordwich, en juillet 1880, une trombe en spirale se détacher d'un nuage sombre d'où jaillissaient des éclairs (2).

La trombe marine qui fut observée à Toulon le 4 mai 1886 était en spirale.

A ces descriptions, à ces remarques, il faudrait évidemment ajouter d'autres particularités spéciales soit aux trombes marines, soit aux trombes terrestres; mais afin d'éviter des longueurs nous réunirons les deux espèces pour voir les caractères qui leur sont communs et en étudier les théories.

Les trombes font entendre un bruit effroyable. D'après Peltier, c'est un bruit sourd qui finit par un sifflement ; ou bien c'est le roulement du tonnerre ; il le compare encore au bruit de charrettes roulant sur des cailloux et plus loin il dit: « C'est comme si le feu prenait à une grange » (3). « Le météore, dit Arago, mugissait avec fureur et cheminait avec un bruit de tonnerre » (4).

M. Reye dit que les trombes sifflent en mugissant et suivant M. Virlet d'Aoust c'est le rugissement du lion (5). M. Legendre, instituteur à Heiltz-le-Maurupt, assure que la trombe du 20 février 1876 faisait un bruit semblable à celui de la grêle mêlée au ronflement d'un violent incen-

(1) *Comptes rendus de l'Acad. des Sciences pour 1879*, T. I, p. 988.
(2) *La Nature*, 1880, T. II, p 214.
(3) *Des Trombes*, Peltier, p. 300 et 329.
(4) *Mélanges*, Arago, p. 321.
(5) *Comptes rendus de l'Acad. des Sciences pour 1876*, T. II. p. 890.

die (1) et M. Faye, en lisant ce rapport, fait remarquer la justesse de la comparaison.

Quant à la tension électrique de l'atmosphère, non seulement elle est extrême, mais encore les phénomènes électriques se manifestent de mille manières lors de l'apparition des trombes. Nous l'avons déjà vu dans les quelques exemples qui précèdent, il est facile d'en citer d'autres :

Le 11 juin 1749: « Une trombe terrible dévasta les environs de Rome et on aperçut des éclairs et des traits de flammes qu'elle poussait de tous côtés » (2).

Près du village de Pommiers on vit, le 9 avril 1770, une colonne noire qui semblait attachée au nuage dont elle suivait la direction en roulant dans les champs une boule de feu considérable, grosse à peu près comme une meule de moulin (3).

Spallanzani, qui observa en 1785 des trombes sur l'Adriatique, parle dans son récit des éclairs nombreux et serpentants qui les sillonnaient. Forster, qui accompagna Cook dans son deuxième voyage, fait la même remarque (4).

Le 4 juin 1814, Griswold se trouve à une petite distance, 400 *m.*, d'un de ces météores, sur le territoire de l'Illinois : « Des éclairs presque continus et d'un éclat incomparable descendaient des nuages vers la terre à une petite surface de la trombe ou peut-être le long même de cette surface, cependant on n'entendait aucune détonation » (5).

Pendant la trombe d'Assonval, le 6 juin 1822, des globes

(1) *Comptes rendus de l'Acad. des Sciences pour 1876*, T. I, p. 810.
(2) *Sopra il turbine*, Boscovich, Roma, 1749.
(3) *Observat. sur la Phys. et sur l'Hist. natur.*, 1782, p. 298.
(4) *Voyages du Cap. Cook*, Forster, T. I, p. 220.
(5) *Notice sur le Tonnerre*, Arago, p. 435.

de feu nombreux s'échappaient avec explosion de la colonne nuageuse « et plusieurs personnes distinguèrent parfaitement la marche tournoyante du météore, sa couleur d'un brun soufré et le centre de feu ardent d'où sortaient des éclats de vapeurs bitumineuses » (1).

Le 4 août 1824, à Messeling, près de Bonn, une trombe s'étant formée, on vit, au moment de sa disparition, un globe de feu s'élancer de son extrémité (2).

Peltier fait encore remarquer que l'on a vu la nuit à l'intérieur de ces trombes une espèce de colonne lumineuse et que, même pendant le jour, d'autres avaient leur extrémité inférieure comme embrasée par un feu électrique (3).

Enfin, M. Ferrière, qui observa le 21 novembre 1876, trois trombes descendantes à Antibes, dit à ce sujet : « ...à 7 h. 25, la première colonne diminua et se retira peu à peu vers le nuage, restant unie à la mer par une gaîne lumineuse nettement définie... » (4).

Nous ne multiplierons pas nos exemples, ajoutons seulement qu'en plus de tous ces phénomènes électriques, intimement liés à l'apparition des trombes, les observateurs relatent des faits réellement inexplicables, si l'on n'admet pas l'action de l'électricité.

Théories des Trombes.

I. Si nous mettons de côté les idées fantaisistes que nous

(1) *Trombes et Cyclones*, Zurcher et Margollé, p. 102.
(2) *Des Trombes*, Peltier, p. 352.
(3) *Idem*, p. 258.
(4) *Comptes rendus de l'Acad. des Sciences pour 1876*, T. II, p. 1061.

avons vu émettre sur les trombes, la première théorie vraiment digne de ce nom date de 1767 ; on la doit à Brisson, le successeur de Nollet. Il démontra que l'électricité était la seule cause de ces phénomènes. Beccaria et Bertholon adoptèrent immédiatement cette opinion et firent de nombreuses expériences pour l'affirmer ; Brisson raisonnait ainsi :

Etant donné deux corps dont l'un est électrisé, il se produit une attraction, mais seulement apparente, car elle est l'effet d'une impulsion et il y a entre ces deux corps deux courants de direction opposée, que Brisson appelle *effluence* et *affluence*. La matière effluente se porte du corps électrisé vers celui qui ne l'est pas et la matière affluente se dirige du corps non électrisé vers l'autre. Ceci posé, si un nuage électrisé se trouve à une distance suffisante, « le nuage lance de toutes parts, et plus fortement qu'ailleurs vers les corps terrestres, des rayons de matière effluente, et dans le même temps, les corps terrestres lui rendent une matière semblable en lui fournissant la matière affluente. Si le courant de la matière effluente est le plus fort, les particules de vapeur qui composent le nuage sont entraînées par cette matière effluente et forment la colonne cylindrique ou conique d'où résulte la trombe, que j'appelle descendante, qui a plus ou moins de diamètre et qui se porte plus ou moins loin suivant le degré d'énergie de la vertu électrique du nuage. Si au contraire, c'est le courant de la matière affluente qui a le plus de force et que le nuage électrisé se présente vis-à-vis de corps qui aient la liberté de se mouvoir, comme lorsqu'il se trouve au-dessus de la surface de la mer ou d'un grand lac, alors la matière affluente entraîne avec elle une quantité de particules aqueuses assez considérables pour former

cette colonne que l'on voit s'élancer vers le nuage et qu'on peut appeler trombe ascendante » (1).

Pour vérifier sa théorie, Brisson fit les expériences suivantes : Il remplit d'eau un petit vase de métal, un dé à coudre, et lui présenta un tube électrisé ; l'eau du vase s'éleva en forme de monticule avec un léger bruissement, une étincelle jaillit de son sommet et le cône retomba. Si le tube électrisé est placé au dessous d'un corps auquel adhère une goutte d'eau, celle-ci s'allonge en cône et vient tomber sur le tube. Bertholon qui, nous l'avons dit, approuve ces idées, s'exprime ainsi : « l'électricité s'échappe de là où elle est en surabondance et elle va tantôt du nuage vers la terre ou de la terre vers le nuage et l'on voit par suite, tantôt des trombes descendantes tantôt des trombes ascendantes » (2).

En 1840, Peltier n'a fait que rajeunir les termes de la théorie de Brisson ; c'est toujours la même, fondée sur la loi des attractions électriques qui jouent évidemment un grand rôle dans ces imposantes manifestations.

H. M. Henry, un des nombreux partisans de l'action électrique, est aussi d'avis que les vents exercent seulement une influence secondaire puisque les trombes peuvent se former en temps calme (3). Il trouve avec raison une analogie entre le bruit des trombes, celui de la grêle et du tonnerre, mais il en conclut peut-être trop rapidement que ces deux phénomènes doivent n'en faire qu'un ; pour lui, la grêle provient de trombes internubaires c'est-à-dire de celles qui se

(1) *Traité de physique*, Brisson, T. III, p. 420.
(2) *De l'Elect. des Météores*. Bertholon, T II, p. 260.
(3) *Etude sur la grêle et les trombes*, Henry, p. 39. Troyes. 1863.

forment au sein des nuages telles que Rozet les a décrites (1).

M. Perrin fait provenir les trombes d'une sorte de décharges électriques, et elles seront descendantes ou ascendantes suivant le sens du courant. Il considère une masse nuageuse M, et, en un point B de laquelle une force électrique négative est accumulée (fig. 72). Il en résultera une tension positive en un point A du sol et une décharge aura lieu de A en B. Si l'on suppose le nuage en mouvement, la masse électrique B est entraînée avec lui et occasionnera par influence le déplacement de la masse A. Ainsi s'explique le mouvement de la trombe.

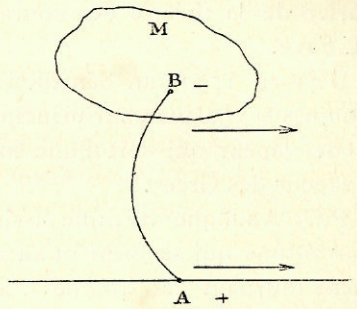

Fig. 72.

La décharge a pour résultat, d'après M Perrin, d'isoler une masse d'air qui peut recevoir un mouvement gyratoire particulier. Car les efforts de déchirement de la terre vers le nuage produisent un courant d'air ascensionnel ; de là, un remous, diverses agitations qui se transformeront bientôt en une gyration régulière (2). Ces efforts de déchirement agissent sur les objets qui se trouvent à la partie inférieure de la trombe, c'est à dire sur le sol, sur les arbres, sur les maisons, etc...

Si au contraire l'électricité positive s'accumule en B il y a des foudroiements successifs de B en A et les grands courants d'air occasionnés par les efforts de déchirement et le mouvement de l'électricité, produisent par suite de

(1) *De la Pluie en Europe*, Rozet, p. 85, Paris, 1855.
(2) *Etude sur les éclairs*, Perrin, p. 70, 1875.

la marche de la trombe, un véritable ouragan qui sévit sur tout le parcours du nuage.

Il nous semble inutile d'insister davantage sur cette théorie assez confuse; d'ailleurs M. Perrin a le tort d'appuyer tout son système sur la marche de la trombe suivant celle du nuage, car on sait que le calme est souvent complet et la direction du vent peu assurée; d'autres fois la trombe suit une direction opposée au courant d'air principal.

III. Abandonnons un instant seulement les théories électriques pour dire quelques mots d'un système que nous avons déjà étudié dans le chapitre de la grêle; nous voulons parler de la théorie des courants tourbillonnaires due à M. Faye.

Déjà en 1780, un bénédictin, D. Lami, donnait aux trombes la chaleur pour principe (1) et il les comparaît au jet de vapeur qui sort d'une éolipyle, la fameuse marmite à vapeur des Grecs.

Puis Andoque voit une assimilation possible entre les tourbillons qui se forment au sein des eaux et le mouvement tournant des trombes résultant, selon lui, du choc de plusieurs courants d'air (2).

Franklin pensait que les trombes naissaient de tourbillons atmosphériques laissant un vide dans leur centre, d'où un effet d'aspiration sur la poussière ou sur l'eau qui poussée aussi par le poids de l'atmosphère environnante, montait à l'intérieur de la trombe (3). Cadwalader-Colden écrivit à Franklin une lettre dans laquelle il nie cet effet d'aspiration, il avait au contraire constaté qu'un jet d'air sortait de l'extrémité inférieure de la trombe, comme d'un soufflet soulevant l'eau en un bourrelet circulaire autour de cette pointe. Pour Monge, les trombes résultent de deux courants d'air de direction contraire qui communiquent à la masse d'air qui les sépare un mouvement gyratoire à axe vertical.

(1) *Conjectures physiques sur deux colonnes de nuées*, Dom Lami. Paris, 1689.
(2) *Histoire de l'Acad. des Sciences* 1727, p. 6.
(3) *Œuvres*. Franklin. T.II. p. 78, Paris, 1775.

C'est donc d'après toutes ces idées que M. Faye, excluant toute cause électrique, a édifié sa théorie si complète des tourbillons descendants à axe vertical.

Il considère d'abord ces tourbillons qui se forment dans les nuages et produisent la grêle (1). Mais : « d'ordinaire, dit-il, ces mouvements gyratoires ne descendent pas plus bas que le nimbus où leur action s'épuise à mouvoir des masses considérables d'eau congelée. Cependant, si la gyration originaire était très vive ou si l'air entraîné n'était pas très chargé de cirrus, elle descendrait jusqu'à terre perçant la couche du nimbus et nous donnerait le spectacle d'une trombe ou d'un tornado » (2).

M. Faye a par suite combattu la croyance des trombes ascendantes (3); d'après le savant académicien, toutes les trombes sont descendantes, et aux nombreux contradicteurs qui surgissent encore tous les jours, MM. Mascart, Colladon, Meunier, H. Hildebrandson, Meldrum, Boué, etc., il oppose toujours des réfutations nouvelles et il appelle à son aide les incessantes observations de ses nombreux partisans pour prouver que les trombes marines ou terrestres sont toutes à courant descendant. Lorsqu'il cite une note de M. Hildebrand Hildebrandson à la Société royale des Sciences d'Upsal sur la trombe de Hallsberg en 1876, et

(1) Voir p. 272.
(2) *Comptes rendus de l'Acad. des Sciences*, pour 1875.
(3) *Histoire d'un Préjugé Nautique*, Annuaire du Bureau des Longitudes, 1875.

dont les conclusions sont opposées aux siennes, c'est pour faire remarquer les déclarations d'un propriétaire, M. Lars Anderson, qui vit une masse de nuages s'abaisser subitement au-dessus de sa tête (1). Puis à propos d'une autre communication, il discute longuement sur la position des arbres renversés par la trombe et il en déduit encore une affirmation pour sa théorie (2).

Si la trombe paraît exercer une influence sur la terre ou sur l'eau placée au dessous d'elle, c'est que, d'après M. Faye, l'air amené en bas par la trombe est ordinairement plus froid que les couches inférieures qu'il traverse et lorsque l'abaissement de température dépasse le point de rosée de l'air extérieur, la trombe se revêt d'une légère nébulosité qui en dessine les contours. Mais si en voyageant, elle vient à pénétrer dans des couches moins chaudes ou moins humides, ou bien si le réchauffement de l'air descendant devient plus marqué, cette gaîne vaporeuse se dissipe, mais la trombe n'en existe pas moins et continue invisible à fouiller circulairement l'eau ou le sol par son extrémité inférieure, de manière à y produire un nuage de gouttelettes d'eau ou de poussière (3).

Il réfute successivement les théories de M. Lalanne qui a observé des trombes ascendantes à Etretat (4), de M. le docteur Boué qui en a vu dans l'Atlantique, près des Hébrides, en Carinthie et sur la mer de Janina (5). Il prétend que, dans ces trombes, les gyrations sont trop rapides pour être perçues ; c'est une trombe d'air qui d'abord frappe la

(1) *Comptes rendus de l'Acad. des Sciences* pour 1876, T. I, p. 179.
(2) *Comptes rendus de l'Acad. des Sciences* pour 1876, T. I, p. 875.
(3) *Comptes rendus de l'Acad des Sciences* pour 1879, T. I. p. 946.
(4) *Comptes rendus de l'Acad. des Sciences* pour 1882, T. II, p. 430.
(5) *Comptes rendus de l'Acad. des Sciences* pour 1878, T. I, p. 696.

mer, l'affouille violemment et projette à une faible hauteur des gouttelettes d'eau qui remontent en spirale produisant une illusion d'optique, et le spectateur croit à un mouvement ascendant. C'est comme lorsque l'on voit, selon M. Faye, tourner un tire-bouchon de gauche à droite, la pointe appuyée sur une table, on jurerait que le tire-bouchon sort de cette table.

« Un tourbillon peut aussi être transparent, dit-il, lorsque l'air descendant qui le forme n'est pas chargé d'eau vésiculaire, et il ne devient visible que s'il s'empare en marchant de la poussière d'eau ou de sable qu'il soulève autour de lui ; tels sont les tourbillons de nos routes ou les trombes de sable des déserts de l'Afrique, du Mexique ou des Indes » (1).

Les formes ondulées que prennent souvent les trombes sont dues, suivant M. Faye, aux vents qui règnent à diverses hauteurs, et le tube vaporeux manifeste alors des ondulations plus ou moins fortes ; d'ailleurs, les détails peuvent changer, mais c'est toujours, dit-il, le même procédé de mécanique. Quant aux phénomènes électriques, ils ne seraient aussi que l'un de ces détails et ne pourraient prétendre à aucune part active.

M. Faye réunit avec soin, pour les présenter à l'Académie, toutes les observations qui lui sont favorables, et au nombre desquelles on peut remarquer les communications de M. Le Goarant de Tromelin (2) et celles de Virlet d'Aoust (3) qui cite les trombes de poussières à courant descendant, *ramolinos de polvo*, dont il a été témoin sur le plateau mexicain.

(1) *Comptes rendus de l'Acad. des Sciences* pour 1876, T. II, p. 763
(2) *Comptes rendus de l'Acad. des Sciences* pour 1873, T. I, p 130.
(3) *Comptes rendus de l'Acad. des Sciences* pour 1876, T. I, p. 890.

En Italie, une conversion s'est faite en faveur de la théorie de M. Faye et ses idées sont adoptées par M. Diamilla Muller et par M. Luvini (1). Enfin, en Allemagne, M. Andriès, directeur de l'Observatoire de Wilhelmshaven, pose des conclusions à peu près semblables.

Mais il a contre lui des théories nombreuses qui admettent la présence de courants ascendants ; en voici quelques-unes : Pour le professeur Mohn, de Christiania, les trombes, comme du reste les tornados et les cyclones, résultent de courants ascendants et aspiratoires qui naissent principalement lorsque l'air est humide, tranquille et fortement échauffé. Dans ces conditions, les couches inférieures se raréfient plus que celles qui sont immédiatement au-dessus, et la moindre perturbation suffit pour que les couches inférieures s'élèvent et gagnent dans les hautes régions la place que leur assignent leur densité et leur poids.

De même, suivant M. Cousté, ce sont des tourbillons à axe vertical et nécessairement ascendants qui ont pour causes déterminantes la pesanteur et la chaleur : celle-ci met en jeu celle-là. Le poids de l'air chasse verticalement de bas en haut la vapeur d'eau moins dense que lui, et par suite, dans le vide que la vapeur a laissé derrière elle en s'élevant, il se forme un courant d'air ascendant (3).

Malgré les efforts de M. Faye pour prouver que les trombes ascendantes ne sont que l'effet d'une illusion et d'un *préjugé nautique*, on trouve de nombreux exemples

(1) *Sette Studi sopra le turbine, la grandine...*, Giovani Luvini, p. 170, Turin, 1884.

(2) *Météorologie* Mohn., p. 409, *Traduction par Decaudin-Labesse.* Paris, 1884.

(3) *Comptes rendus de l'Acad. des Sciences* pour 1876, T. I, p, 425.

qu'il semble bien difficile de nier. Outre ceux que nous avons cités, M. Colladon a relevé de nombreux cas de trombes ascendantes (1). Le 19 décembre 1887, deux trombes *s'élevaient* sur le lac de Genève, tournoyaient pendant quelques secondes et s'abîmaient en écume (2).

Il faut aussi rappeler que la trombe de Châtenay en 1839 aspira l'eau d'un étang qu'elle déversa plus loin avec les cadavres d'un millier de poissons, et M. Lalanne dit qu'en Normandie des trombes terrestres rejetèrent avec des torrents d'eau un certain nombre de poissons de mer (3 . D'ailleurs, les expériences de M. Wehyer prouvent qu'un mouvement gyratoire élevé peut produire un courant ascendant ; il a reproduit des trombes en miniature au-dessous d'un tambour qu'il faisait tourner rapidement (4). M. Colladon a obtenu le même résultat avec un agitateur à palettes (5).

Par la rotation d'appareils divers le Dr Martinez Ancira de Mexico a reproduit également les petites trombes d'eau ou de poussière et il conclut de ses expériences que sans trajectoire spirale, un tourbillon n'aurait pas la force d'enlever des corps plus lourds que l'air.

Pour lui aussi, les trombes sont ascendantes : le soleil chauffe l'air en un point quelconque de l'atmosphère, le raréfie et le fait monter ; l'air des alentours se précipite vers le vide et forme des tourbillons ascendants qui résu-

(1) *Comptes rendus de l'Acad. des Sciences* pour 1879, T. II, p. 285.

(2) *La Nature*, 1887, T. II. Chronique météorologique ; *Journal de Genève.*

(3) *Comptes rendus de l'Acad. des Sciences* pour 1882, T. II, p. 430.

(4) *Comptes rendus de l'Acad. des Sciences* pour 1887, T. I, Séance du 7 février.

(5) *Comptes rendus de l'Acad. des Sciences* pour 1887, T. I, Séance du 12 avril.

ment la trombe, invisible si elle est d'air seulement, visible si elle se compose de poussières de terre ou d'eau (1).

Que de fois, du reste, n'a-t-on pas été témoin de ces courants ascendants dont la direction devient visible par les effets qu'ils produisent ; c'est à dire que des objets relativement pesants ont été enlevés verticalement à de grandes hauteurs.

De très nombreuses observations peuvent facilement être relevées si l'on veut prouver le mouvement ascensionnel marqué de certaines trombes comme celle du 17 juin 1889 citée par M. Tardy à Vergougiat, Ain, qui aspira l'eau d'une petite rivière, le Solnau, et la projeta en dehors dans un mouvement ascendant gyratoire de droite à gauche; puis la trombe du 8 juillet de la même année enlevant d'énormes tas de foin près d'Annecy, à une hauteur de 200 *m.* environ; ce phénomène se produisit en temps calme; enfin celle du 23 juin 1890 a présenté les mêmes caractères par un temps lourd, orageux et sans la moindre brise, etc...

Une observation du P. Marc Dechevrens, directeur de l'Observatoire de Zi-ka-wei, Chine, semble, prouver l'existence de courants ascendants aussi bien que descendants : pendant la durée d'un tourbillon, un clino-anémomètre accusa la présence alternative de ces deux courants, et l'on pouvait se convaincre, par l'immobilité de l anémomètre Robinson, qu'il n'existait aucun courant horizontal (2). Pouillet croyait aussi qu'une trombe peut se composer de deux courants, l'un ascendant, l'autre descendant (3).

(1) *La Nature, 1891*, T. 1, p. 76.
(2) *Idem* 1887, T. I, p. 142.
(3) *Traité de Physique*, Pouillet, T. II. p. 709.

Enfin si M. Faye invoque les illusions d'optique contre ceux qui ont observé des courants ascendants, on pourrait se servir du même argument pour mettre en doute les rapports favorables aux courants descendants. Quant à sa comparaison du tire-bouchon (1), il est aussi vrai de dire que si on le fait tourner de droite à gauche, il a l'air d'entrer dans la table alors que plutôt il en sort.

En résumé, tout en admirant l'enchaînement de la théorie de M. Faye qui fait venir des courants tourbillonnaires la plupart des perturbations atmosphériques, et tout en reconnaissant que les lois qu'il a établies sont appuyées sur des observations nombreuses, on voit qu'on ne peut admettre la formation de courants exclusivement descendants. Il est difficile aussi de ne pas s'apercevoir qu'il écarte d'une façon quelque peu systématique toute action de l'électricité. M. Faye a bien compris qu'une seule loi devait régner sur toutes ces perturbations ; mais il voit ce principe dans la chaleur d'où proviennent les courants aériens, puis des tourbillons, sans vouloir admettre que chaleur, lumière et électricité peuvent être des transformations inséparables l'une de l'autre, si même les deux premières ne dérivent pas de la troisième seule. En tout cas, la théorie de M. Faye, si admissible qu'elle soit, laisse bien des choses inexplicables. Des tourbillons qui naissent pour ainsi dire d'eux-mêmes ne nous semblent pas capables d'acquérir cette force destructive qui fait notre effroi

M. Ch. Jundel compare, il est vrai, pour donner une idée de la formation des tourbillons, leur mouvement tournant à celui d'un patineur lancé à toute vitesse qui en ren-

(1) Voir p. 307.

contre un autre marchant moins vite ; il le prend par la main et tourne en cercle autour de son compagnon tout en l'entraînant avec lui (1).

D'autres théoriciens ont pris pour exemple les tourbillons qui naissent derrière les piles d'un pont ou au milieu d'une rivière, autour d'un obstacle quelconque ; mais il faut remarquer que ces courants liquides prennent un point d'appui autour duquel ils tournent comme aussi les patineurs de M. Jundel. Il peut se former dans les rues, dans les espaces resserrés, des tourbillons analogues, mais ces comparaisons ne peuvent convaincre que dans l'atmosphère les conditions soient les mêmes et que la réunion de deux courants, de différentes vitesses et de même direction, ou de directions opposées, aient la puissance d'engendrer par leur simple rencontre des tourbillons réguliers tels que trombes, tornados et cyclones. Pourraient-ils, de plus, produire ces effets étranges qui sont identiques à ceux de l'électricité? Et ces trombes qui se forment subitement, en temps calme, sous un ciel orageux, à l'époque où le potentiel électrique de l'atmosphère atteint son maximum...?

Comment supposer que dans la trombe du 18 juin 1780, par exemple, au château de Leüc, le vent ait pu arracher, en plusieurs endroits, les dalles de la cour sur lesquelles il n'avait évidemment aucune prise? Les arbres atteints par la trombe de Châtenay furent desséchés, roussis, les troncs avaient reçu des entailles nettes et profondes ; d'autres, d'abord coupés, étaient fendus verticalement et divisés en une infinité de lattes minces et légères. N'avons-nous pas étudié les effets de la foudre sur les arbres, et n'est-ce pas là cette action qui s'exerce spécialement aux points où une résistance est offerte au passage du courant.

(1) *Comptes rendus de l'Acad. des Sciences* pour 1877, T. I, p. 568.

Mais nous avons suffisamment parlé plus haut des manifestations électriques qui accompagnent les trombes, nous nous bornons à citer ici deux observateurs autorisés qui résument ainsi leur opinion : « Avec les trombes apparaissent aussi d'abondantes averses de grêle, dont la formation paraît liée à l'électricité ainsi qu'au mouvement gyratoire de ces météores. La pointe de leur cône paraît avoir souvent l'éclat d'un métal rougi au feu et être le siège d'énergiques attractions et répulsions. Son passage au-dessus d'une étendue d'eau peut déterminer des décharges fulminantes assez fortes pour tuer les poissons qu'elle renferme et pour vaporiser une grande partie du liquide » (1). M. Zurcher dit encore, au sujet des trombes qui apparurent dans la rade de Toulon le 28 février 1881 : « Pendant la nuit, des nuages orageux venus de l'ouest ont passé rapidement, accompagnés de violents coups de tonnerre indiquant probablement l'action de l'électricité atmosphérique » (2). Enfin même l'observation de M. Ferrières, un des partisans de la théorie de M. Faye, nous montre clairement cette action quand, au sujet des trois trombes du cap d'Antibes, il dit : « La deuxième descend toujours, elle va rejoindre certainement la mer, lorsque soudain, de la zône pluviale, jaillit un immense éclair, la trombe s'arrête, elle s'effile, le cylindre noirâtre se retire peu à peu vers le nuage » (3). Ne voit-on pas l'influence indéniable de cette décharge électrique sur la formation de cette trombe qui n'aurait évidemment pas été modifiée sans une intervention visible de l'électricité ?

IV. Planté nous démontre l'évidence de cette inter-

(1) *Trombes et Cyclones*, Zurcher et Margollé, p. 32.
(2) *La Nature*, 1881, p. 257.
(3) *Comptes rendus de l'Acad. des Sciences* pour 1876, T. II, p. 1061.

vention ; à l'aide des puissants moyens dont il dispose, il a pu faire des expériences qui, tout en rappelant celles de Brisson, les dépassent de tout le progrès accompli en électricité depuis un siècle.

« Les trombes, nous dit-il, sont des effets électro-dynamiques produits par les forces combinées de l'électricité atmosphérique et du magnétisme terrestre » (1).

Planté pose ce principe, d'après les expériences suivantes :

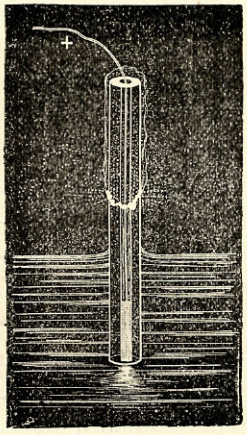

Fig. 73.

1° Une veine d'eau salée s'écoule d'un entonnoir dans une cuvette au-dessous de laquelle est placé un électro-aimant. Le pôle positif d'une batterie de 400 couples secondaires communique avec l'entonnoir ; dès que le pôle négatif touche à l'eau de la cuvette, on aperçoit un filet lumineux à la partie inférieure de la veine liquide ; des étincelles jaillissent de son extrémité, de la vapeur d'eau se dégage et le liquide de la cuvette prend un mouvement gyratoire en sens inverse de celui des aiguilles d'une montre si le pôle de l'aimant est boréal, et dans le même sens s'il est austral.

2° Un flux électrique produit aussi des effets remarquables d'aspiration ; car si on introduit le fil positif de la batterie dans un tube capillaire, aussitôt qu'on plonge ce tube dans de l'eau distillée en communication avec le fil négatif, on voit le liquide s'élever avec une incroyable rapi-

(1) *Comptes rendus de l'Acad. des Sciences* pour 1876, T. I, p. 220, et *Phénomènes électriques de l'Atmosphère*, G. Planté, p. 134.

dité et retomber en nappe sillonnée de traits brillants et de jets de vapeur (fig. 73).

Enfin ces effets peuvent être modifiés de mille manières différentes, et Planté produit avec 800 couples un cône liquide qui s'élève vers l'électrode positive enveloppée dans un morceau de papier à filtrer humide (fig. 74), ou bien on voit encore, avec la machine rhéostatique de quantité, un jet d'eau continu s'élancer à une grande hauteur si l'on raccourcit ce tube capillaire. En dernier lieu, Planté rappelle l'expérience que nous avons déjà citée à

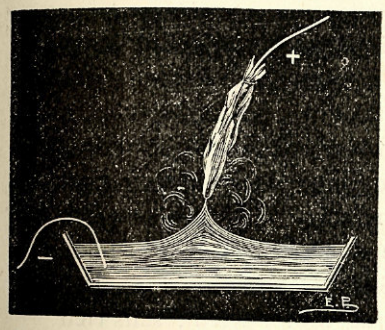

Fig. 74.

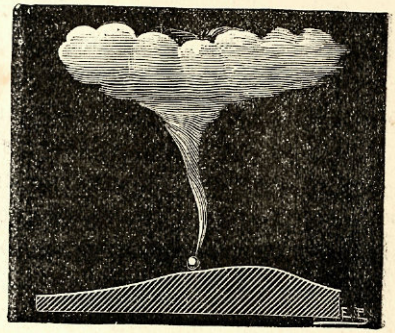

Fig. 75.

propos des nébuleuses spirales (1) et dans laquelle un nuage d'oxyde prend, sous l'influence d'un aimant, un mouvement gyratoire dont le sens est réglé par le pôle de l'aimant qui lui est présenté.

Quant à la foudre globulaire, dont l'apparition accompagne souvent les trombes, Planté nous fait remarquer qu'il a obtenu des globules de feu au-dessus d'une surface conductrice quelconque à l'aide d'un courant de haute tension et que ces globules suivaient naturellement les mouvements de l'électrode à l'extrémité de laquelle ils se

(1) Voir p. 82.

produisent (1). Il en est de même dans la nature : « car, dit-il, si un nuage orageux chargé d'une grande quantité d'électricité vient à passer à une faible hauteur au-dessus du sol, il peut se former une colonne ou trombe d'air humide fortement électrisée visible ou invisible, qui sert d'électrode et produit l'écoulement du courant électrique sous forme d'un globe de feu qui apparaît à son extrémité » (fig. 75).

Nous voyons donc toutes les manifestations générales ou particulières des trombes reproduites dans ces expériences : Et les effets descendants et les effets d'aspiration, et les phénomènes lumineux avec ou sans détonation ; enfin l'action régulatrice de l'aimant sur le sens de la gyration du liquide ou du nuage d'oxyde nous démontre bien que les tourbillons des courants atmosphériques ainsi que le mouvement de rotation des trombes naissent sous l'influence du magnétisme terrestre, et que ces rotations sont, dans notre hémisphère, de sens contraire au mouvement des aiguilles d'une montre. De nombreux exemples nous en sont fournis par Noad (2), Sorel (3), Fineman (4), etc. D'autres météorologistes tels que Mohn disent, sans rien préciser, que les trombes tournent tantôt à droite et tantôt à gauche (5). Mais, d'ailleurs, comme il est certain, ainsi que l'ont assuré MM. Faye, Andriès et tant d'autres, que trombes, tornades et cyclones sont des phénomènes identiques, nous en concluons que les trombes doivent se comporter comme les cyclones qui tournent dans l'hémisphère boréal en sens contraire des aiguilles d'une montre.

(1) Voir p. 172.
(2) *Text book of electricity*, p. 98. London, 1879.
(3) *La Nature*, 1886, T. II, p. 47.
(4) *Annuaire de la Société météorologique de France*, 1884, p. 123.
(5) *Météorologie*, Mohn, p. 407.

II

TORNADES

Les *tornades* ou *tornados*, qui ont reçu leur nom des navigateurs espagnols, ont eu de nombreux historiens : Reid, Redfield, Henri Piddington les ont classées et assimilées aux cyclones, le docteur Borius a décrit les tornades si fréquentes du golfe de Guinée et de la côte d'Afrique, M. Finley les a particulièrement étudiées aux Etats-Unis. Les tornades peuvent être quelquefois confondues tantôt avec les trombes, tantôt avec les cyclones, car leur diamètre varie entre 15 *m.* et 3,500 *m.* ; mais en général leur dimension ne dépasse pas 500 *m.* Souvent même une trombe peut se former dans une tornade, ou encore la tornade se réduit aux dimensions d'une trombe.

Il n'y a pas à recommencer ici des théories qui sont nécessairement les mêmes pour des phénomènes identiques ; nous n'avons à examiner que les caractères particuliers des tornades, à en donner certains exemples et à réunir quelques-unes des nombreuses observations qui concourrent toutes à admettre l'action puissante de l'électricité naturelle dans la formation de ces météores.

I. Dans les tornades, le mouvement gyratoire est plus violent et plus rapide, il s'agrandit et c'est une masse déjà consi-

dérable qui lance la foudre, la grêle et qui s'en va en tournoyant briser sur le sol ou sur mer tout ce qui lui fait obstacle. Cette gyration est toujours dirigée dans le sens des aiguilles d'une montre dans l'hémisphère austral, et en sens contraire dans notre hémisphère. Ce mouvement de rotation peut atteindre une vitesse de 150 *m.* à la seconde; quant au mouvement de translation, il varie entre 5 *m.* et 30 *m.* à la seconde, ce qui donne une moyenne de 17 *m.* La direction la plus ordinaire est du S.-O. au N.-E. et la trajectoire est parabolique.

L'apparition du tornado est caractérisée par un nuage noir qui descend vers le sol en forme d'entonnoir, et nous retrouvons les manifestations des trombes ainsi que leurs effets, mais plus agrandis et plus violents.

D'après Piddington, une tornade s'annonce par un arc complet de nuages noirs qui s'élève vers le zénith et dont la marche est accompagnée d'éclairs incessants; puis le cercle se resserre, on entend bientôt le vent mugir et le fracas de la mer se mêle au bruit déchirant des décharges électriques, au sifflement des grêlons qui se précipitent, et le tornado, composé de toute cette masse d'éléments déchaînés, accourt et brise le navire qui n'a pas su prendre à temps les précautions nécessaires pour combattre le danger ou pour l'éviter.

Ou bien encore : « On ne voit d'abord paraître à une grande hauteur dans le ciel parfaitement calme qu'une petite nuée de forme circulaire, une tache de couleur argentée, appelée *œil de bœuf*, qui s'accroît bientôt, descend vers l'horizon avec un mouvement visible. En s'approchant, elle s'entoure d'un anneau noir qui s'étend dans toutes les directions et finit par s'envelopper d'épais nuages d'où jaillit l'éclair d'une large flamme électrique. Le tourbillon

se rapproche rapidement et se précipite avec une incroyable violence au milieu des formidables éclats de la foudre et d'une pluie torrentielle. Quelques fois, au lieu d'un tornado, l'œil de bœuf amène un grain blanc furieux » (1).

II. Pendant le tornado qui sévit dans le Kansas le 30 mai 1879, les témoins du phénomène virent se mouvoir une nuée immense en forme d'entonnoir, qui descendit animée d'un rapide mouvement de rotation et d'un irrésistible pouvoir d'attraction et balaya la contrée en tordant tous les obstacles sur son passage : « Les maisons disparaissaient, emportées comme des brins de paille » (2).

Le 19 mai 1883, dans le territoire de l'Illinois, vers 4 heures de l'après midi, des observateurs remarquèrent deux énormes nuages noirs qui traversaient le ciel dans des directions opposées; l'un venait du S.-E., l'autre du N.-O. Ces deux nuages se rencontrèrent avec un bruit comparable à celui de plusieurs trains de chemin de fer passant à la fois sur un pont. Ce bruit effrayant se prolongea pendant deux minutes et se termina par un violent coup de tonnerre. Les nuages restèrent un moment stationnaires, puis se mirent à tourner en se dirigeant vers le nord; ils formaient un tourbillon de un quart de mille de diamètre qui touchait terre de temps en temps en poursuivant sa course folle : « La vitesse du cyclone, dit M. d'Abbadie, augmentait à mesure qu'il s'approchait de la ville de Racine; il ressemblait à un énorme tuyau de 500 pieds de haut, au sommet duquel les éclairs jaillissaient » (3).

Le tornado de Catane du 7 octobre 1884 ne fut pas moins violent. Vers 10 heures du matin, l'Etna se couvre

(1) *Trombes et Cyclones*, Zurcher et Margollé, p. 151.
(2) *La Nature*, 1879, T. II, p. 117.
(3) *Idem*, 1883, T. II, p. 397.

et humides où se forment les nuages. Mais si tout orage, avec son accompagnement de tonnerre, de grêle et de pluies diluviennes est dû à un mouvement gyratoire, la réciproque n'est pas vraie ; il y a des gyrations sèches qui naissent dans des courants dépourvus de cirrus et qui, en pénétrant dans les couches inférieures, n'y déterminent ni orages, ni grêle, ni averses, parce qu'ils n'amènent avec eux aucun élément de condensation et de congélation par la vapeur d'eau » (1).

Sur 119 exemples, M. Finley en compte 70 précédés de phénomènes d'électricité et de formation de globes de feu, et 49 sans aucun signe électrique. Mais nous savons par les expériences de Planté que l'électricité peut produire soit des trombes descendantes, soit des tourbillons aspiratoires sans phénomènes visibles ; et, dans ce cas, c'est le nuage ou la trombe qui conduit au sol le courant électrique et qui complète avec la pluie un circuit de conductibilité parfaite.

Parfois, du reste, l'action de l'électricité est tout à fait visible : dans le tornado du Kansas, par exemple, les nuages se rencontrent, et c'est sous l'effet d'une formidable décharge que le tournoiement commence.

Les orages qui sévirent en France pendant le mois d'août 1890 ont présenté un caractère de violence exceptionnelle dans nos pays tempérés. Ils ont été remarquables par les manifestations électriques qui les accompagnèrent.

La formation de la tornade qui dévasta Dreux le 16 août à 10 *h.* du soir s'est accomplie au milieu du feu incessant des éclairs sillonnant les deux nimbus d'où sortit la tornade; des grêlons énormes furent précipités, puis à 10 *h.* 15 *m.*, un

(1) *Annuaire du Bureau des Longitudes* pour 1886, p. 23

grondement intense, semblable à celui que produirait un train en marche sous un tunnel, se fit entendre et un tourbillon aspirant, constituant la trombe, se lança avec une vitesse de 40 *m.* à la seconde, renversant, brisant tout sur son passage.

Si l'on remarque que pendant cette épouvantable catastrophe, les chutes de foudre furent très rares, on doit en conclure à l'accumulation totale du fluide dans la tornade à la constitution de laquelle elle avait évidemment présidé.

A Saint-Claude, les phénomènes électriques se sont encore montrés plus apparents. Le 19 août à 7 *h.* 40 *m.* du soir la tornade s'est formée, de même qu'à Dreux, au milieu d'un ciel en feu : « Le météore, dit M. Duparchy, marchait avec une vitesse vertigineuse, précédé d'une nappe éblouissante d'où la foudre s'échappait incessamment en gerbes et sous toutes les formes, mais surtout sous l'aspect de grenades ou boules de feu. Quand la trombe a passé sur Saint-Claude, les habitants ont cru que la ville entière était embrasée, puis tout s'est éteint instantanément » (1).

De tous côtés, sur tout le parcours du météore ce ne sont que manifestations électriques intenses, feux Saint-Elme, nappes éblouissantes, foudre globulaire de toutes dimensions, éclairs rapides et continus qui embrasent des maisons, brisent et hachent les arbres, percent et trouent les murs, foudroient les hommes (2).

Pendant la durée du phénomène, il n'est tombé que

(1) *La Nature*, 1890, T. II, p. 23.

(2) *Comptes rendus de l'Acad. des Sciences pour 1890*, T. I. séance du 6 octobre ; *la Nature*, 1890, T. II, p. 321 et *Rev. Intern. de l'Elect.*, 1890, T. II, p. 352.

quelques gouttes de pluie ; la grêle n'a fait son apparition qu'en Suisse, lorsque la tornade, après avoir gravi les chaînes du Jura, est descendue vers le lac de Neuchâtel. La vitesse de translation du météore qui doit rentrer dans la catégorie des tornades était de 18,8 *m.* à la seconde ou 68 *kilom.* à l'heure. Sa largeur moyenne était de 600 *m.*; elle a varié entre 200 *m.* et 1000 *m.* Les trois zones : dangereuse, maniable et calme étaient, suivant M. Gautier, très nettement caractérisées (1).

En Bretagne, à Rimon, à Domagné, une tornade a présenté, le 18 août, les mêmes phénomènes intenses d'électricité : nappes de feu, coups de foudre incessants, effets foudroyants des plus divers tels que : arbres déchiquetés, brûlés, hachés ou coupés suivant les essences, etc.

« Si l'on rapproche les uns des autres ces différents faits, dit à ce sujet M. Jeannel, l'état électrique très prononcé de l'atmosphère avant la trombe ; les feux Saint-Elme et les éclairs rasant le sol qui la précèdent et cessent sitôt qu'elle a passé ; la masse énorme d'électricité mise en jeu, n'est-on pas induit à penser que l'électricité, loin de jouer un rôle secondaire est peut-être la cause déterminante de la tempête » (2).

D'autre part, le Dr Baddeley, qui a observé des tourbillons de poussière à Lahore, a constaté, pendant leur durée, une forte tension électrique. Comment accorder cette observation avec la théorie de M. Faye ? Car il n'y a ici ni les particules glacées des cirrus, ni l'électricité amenée des hautes régions par les mouvements gyratoires, et

(1) *Comptes rendus de l'Acad. des Sciences pour 1890*, T. II, séance du 15 septembre.

(2) *Comptes rendus de l'Acad. des Sciences pour 1890*, T. II, séance du 22 décembre.

pourtant l'électricité se manifeste de telle manière qu'elle est considérée par le Dr Baddeley comme le principe de ces tornades sèches : « Les tempêtes de poussière, dit-il, sont causées par des colonnes de fluide électrique passant de l'atmosphère à la terre ; elles ont un mouvement en avant, un mouvement rotatoire et un mouvement spirale particulier de haut en bas. Il paraît probable que dans une tempête étendue de poussière, la plupart de ces colonnes se meuvent ensemble dans la même direction, et que pendant la durée de la tempête, des rafales soudaines et nombreuses ont lieu à des intervalles dans lesquels la tension électrique est à son maximum..... C'est un fait curieux que quelques-unes des plus petites tempêtes de poussière sont longtemps stationnaires, presque une heure, et pendant tout le temps la poussière et les corps légers du sol conservent en l'air leurs mouvements tourbillonnants... Je pense que les phénomènes liés aux tempêtes de poussière sont identiques à ceux qui se présentent dans les trombes, dans les grains blancs à la mer, dans les tempêtes rotatoires et dans les tornades de toute espèce, et qu'ils naissent de la même cause, c'est à dire de colonnes mobiles d'électricité » (1).

En 1847, M. Baddeley plaça en l'air un fil de cuivre isolé sur un bambou au sommet de sa maison et en fit communiquer l'extrémité avec un électromètre à lames d'or. Il observa, pendant le passage d'une tempête de poussière, de vives étincelles qui jaillissaient du fil métallique et l'électromètre accusait une forte tension. Il renouvela cette expérience plus de soixante fois et il obtint les mêmes phénomènes. De plus, le courant cessait avec la chute de

(1) *Trombes et Cyclones*, Zurcher et Margollé, p. 152.

la pluie ou ne se manifestait de nouveau que pour indiquer une reprise de la tempête :

« Le ciel est clair, dit le Dr Baddeley, pas un souffle d'air en mouvement ; vous voyez bientôt un banc de nuages très bas à l'horizon que vous vous étonnez de n'avoir pas observé auparavant. Quelques secondes se sont écoulées et le nuage a couvert un demi hémisphère ; il n'y a pas de temps à perdre, c'est une tempête de poussière et chacun à la hâte se précipite dans sa maison pour éviter d'y être enveloppé. Le fluide électrique continue à descendre sans cesse par le fil conducteur pendant la durée de la tempête ; les étincelles ont souvent plus d'un pouce de longueur et émettent un sourd craquement ; son intensité, qui varie avec la force de la tempête, est plus forte pendant les rafales. »

Ces tourbillons ne sont pas seulement l'attribut de l'Inde, c'est le *kamsin* d'Egypte, le *sirocco* d'Algérie, le *simoun* du Sahara, etc..... qui doivent être classés dans la catégorie des vents circulaires. M. Amat rappelle qu'en 1840, Arago donnait connaissance à l'Académie d'une lettre de M. Ledinghem, lieutenant du génie, dans laquelle cet officier raconte qu'étant en marche de Blidah à Alger, il vit, pendant un coup de sirocco dans les gorges de Chiffa, chaque bouffée de vent faire jaillir les étincelles de la frange de ses épaulettes (1).

Nous pouvons dire enfin que tous ces ouragans, tornados, grains blancs, tornades sèches, tourbillons et bourrasques, dont les noms seuls changent, qu'ils soient ou non accompagnés de grêle, de pluie, de poussière, de phénomènes électriques visibles, qu'ils naissent ici ou là, aux

(1) *Comptes rendus de l'Acad. des Sciences pour 1880*, T. I, p. 446.

Indes, aux Antilles, au Cap de Bonne-Espérance ou sur la côte occidentale de l'Afrique, peuvent être considérés comme une même manifestation dérivant d'un même principe. Ce sont des courants électriques qui se meuvent sous l'influence du magnétisme terrestre et qui produisent ainsi toutes ces perturbations dont la violence est réglée par la conductibilité de l'atmosphère et du sol.

III

CYCLONES

Il faut comprendre sous ce nom générique de *cyclone* toutes les grandes tempêtes tournantes qui agitent l'atmosphère dans les deux mondes : les *typhons* ou *ti-phong* des Chinois, les *ouragans* des Indes, les *sumatras, grains arqués* et *pampères* du détroit de Malacca.

En outre des distinctions que nous avons déjà signalées, les trombes, tornades, grêles, averses torrentielles, orages électriques,..... comparés aux cyclones, sont, d'après M. Faye, des phénomènes accessoires de peu de durée. Ils se produisent sur le flanc droit des cyclones et en dehors de leur trajectoire : « C'est ainsi, dit-il, que les trombes, les orages et les grêles du mois d'août 1890 ont très probablement accompagné, mais avec des vitesses propres, des cyclones passant au nord de ces régions, venant de l'Atlantique et se dirigeant vers un point situé entre le nord et l'est (1). »

Toutes les lois qui régissent les cyclones, c'est à dire le sens de leur rotation, la direction de leur trajectoire, leur constitution, leur vitesse de translation, ont été successivement étudiées et formulées par Reid, Redfield, Loomis, Piddington, Dove..... Nous ne détaillerons pas toutes ces lois, nous ne donnerons pas les différentes théories qui expliquent la formation de ces tempêtes et leur mode de fonctionnement : le système de Mohn, par exemple, fondé sur le principe des courants ascendants et aspiratoires des bords vers le centre, la théorie des vents en spirale de M. Meldrum, directeur de l'observatoire de Maurice, et une autre analogue de M. Wilson, directeur de l'observatoire de Calcutta ; celle du P. Dechevrens, des vents convergents, et celle de M. Faye, dans laquelle il détermine la formation de ces tourbillons ainsi que leur trajectoire, d'après la direction des fleuves aériens et d'après leur distribution. Nous voulons simplement indiquer à grands traits les principaux caractères de ces gigantesques perturbations et faire remarquer leur similitude complète avec les trombes et les tornades. Nous verrons que les manifestations électriques

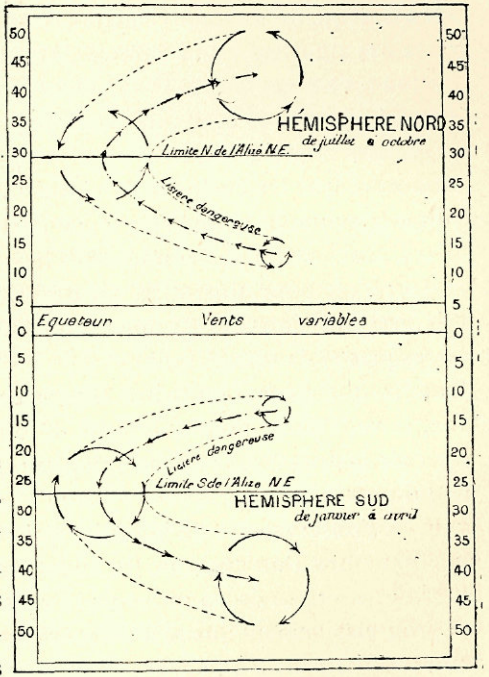

Fig. 76.

(1) *Comptes rendus de l'Acad. des Sciences pour 1890*, T. II, séance du 8 septembre.

INSTITUTO DE FÍSICA DA U... BIBLIOTECA

s'agrandissent à mesure que s'agrandit la violence et la dimension du phénomène.

I. Les cyclones se forment ordinairement sur le 10e degré de latitude Nord ou Sud (fig. 76). Dans l'hémisphère Nord, leur trajectoire est dirigée vers le O.-N.-O., elle coupe le 30e degré à la limite N. de l'alizé du N.-E. et revient vers le N.-N.-E.; quant au mouvement gyratoire, il est en sens inverse des aiguilles d'une montre. Dans l'hémisphère Sud, le cyclone s'en va vers le O.-S.-O. et revient, à partir du 26e degré, dans le S.-S.-E; il tourne dans le même sens que les aiguilles d'une montre.

A mesure que les cyclones s'éloignent de l'équateur, leur rayon augmente, et enfin, vers le 45e degré des deux hémisphères, leur cercle est immense et leur force de rotation s'épuise; c'est pour ainsi dire par des ricochets successifs qu'ils arrivent dans les régions tempérées sous forme de bourrasques et de tourbillons.

Tandis que dans l'immense espace couvert par le cyclone, le vent siffle, mugit, brise et dévore tout, au centre, *à l'œil de la tempête*, le calme complet règne sur une étendue qui peut avoir quelquefois jusqu'à 40 kilomètres de rayon. A l'observatoire de Manille, qui se trouva en 1887 sur le parcours d'un cyclone, les anémomètres marquèrent d'abord une vitesse de 10 *m.*, puis le vent alla en augmentant progresssivement jusqu'à un maximum de 54 *m.* pour tomber subitement à 0; après un quart d'heure de calme, la vitesse maxima de 54 *m.* reparut et redescendit jusqu'à 10 *m.* (1).

C'est au centre du cyclone que se trouve évidemment le minimum barométrique; la colonne de mercure descend

(4) *Comptes rendus de l'Acad. des Sciences pour 1887*, T. I.

souvent à 0,712 *m.* et 0,710 *m.*, elle peut même s'abaisser jusqu'à 0,700 *m.* et 0,698 *m.*, et le 12 mai 1886, pendant le cyclone de Madrid, les instruments enregistrèrent un minimum de 695 *m.*

D'après le commandant Bridet, les marins doivent considérer le cyclone comme divisé en deux zones : le demi-cercle maniable et le demi-cercle dangereux. Dans le premier demi-cercle, le navire tend à être rejeté en dehors du cyclone et il ne reçoit que la différence des forces de rotation et de translation; tandis que dans le demi-cercle dangereux, qui se trouve toujours à l'intérieur de la parabole décrite par le cyclone, le navire, attiré vers le centre, subit l'effort des deux forces additionnées de rotation et de translation. Il est donc important pour un commandant de pouvoir déterminer le centre du cyclone; il lui est, du reste, facile de le trouver graphiquement d'après les vents successifs que son navire commence à recevoir, puisqu'il connaît le sens de rotation du cyclone ainsi que la direction générale de translation; ou bien encore, suivant la loi de Buys-Ballot, lorsqu'on tourne le dos au vent dans l'hémisphère Nord, on obtient la direction du centre de dépression en étendant le bras gauche un peu en avant, et dans l'hémisphère Sud, on doit étendre le bras droit aussi un peu en avant. Il faut donc manœuvrer d'après la vitesse de translation pour ne traverser le cyclone que dans le demi-cercle maniable et en sortir le plus promptement possible; mais souvent des avaries, dans la mâture pour les bâtiments à voiles ou dans les chaudières pour les navires à vapeur, ont déjoué tous les calculs, et la théorie s'est trouvée en défaut en face de circonstances imprévues.

Il est presque inutile de dire combien les effets d'un

cyclone sont encore plus désastreux sur terre. Des villes entières peuvent être détruites de fond en comble ; tout devient un projectile contre l'homme sans défense, il ne trouve aucun refuge capable de résister aux éléments déchaînés et risque à chaque instant d'être broyé dans la campagne ou dans les villes par les arbres, les rochers et les débris de toute sorte que l'ouragan fait voler de tous côtés ; heureux encore si la terre ne lui manque pas sous les pieds et ne s'entr'ouvre pas comme secouée par un effort suprême pour engloutir ce que la tempête a épargné. Comme exemple de puissance dévastatrice, on cite souvent le grand cyclone du 10 octobre 1780 qui s'étendit depuis les Antilles jusque dans le nord de l'Atlantique ; ses ravages furent effroyables : à la Barbade, rien ne resta debout ; à Sainte-Lucie, 8,000 personnes furent écrasées sous les édifices ; plus de 10,000 périrent à la Martinique tant sur terre que sur mer, 1,000 à Saint-Pierre... Il faut enfin compter un total dépassant 50,000 victimes.

II. Des phénomènes électriques innombrables apparaissent pendant ces tempêtes avec une violence et un éclat dont on ne peut se faire une idée dans nos pays. Une tension électrique des plus élevées est tout d'abord infailliblement le signe précurseur d'un cyclone ; des feux, des aigrettes s'échappent en crépitant de toutes les pointes, puis ce sont des éclairs incessants qui sillonnent les nuages amoncelés et qui annoncent l'approche de la tempête. Les courants d'air de directions opposées se croisent, et les nuées amoncelées se rencontrent et se mêlent ; avec le fracas assourdissant des décharges électriques, des nappes de feu apparaissent à l'horizon comme au zénith, éclairant de leur lumière blafarde l'horrible scène qui se prépare. Le tourbillon commence, il s'élance, agrandit ses spires, balaye,

creuse et soulève la mer en montagnes liquides qui s'écroulent en mugissant et se dressent de nouveau pour s'affaisser encore ; le cyclone dans toute sa force dévaste les continents et les mers et s'en va porter la désolation sur tout son parcours.

Le potentiel électrique semble atteindre son maximum au centre du cyclone. La frégate la *Junon* traversa ce milieu dangereux, malgré les efforts du commandant, le 30 avril 1868, près de la Réunion : « La tourmente durait depuis plusieurs heures, écrit un officier, redoublant à chaque instant de violence et de bruit, quand tout à coup un silence absolu se fit ; un silence que je ne puis comparer qu'à celui qui suit l'explosion d'une mine sur un bastion pris d'assaut. C'était le calme central, calme subit et étrange qui produisit plutôt de l'étonnement qu'une impression de sécurité, tant on s'y sentait comme en dehors des lois ordinaires de la nature. Le mouvement de tourbillon continuait dans le haut de la colonne d'air dont nous occupions la base. Des oiseaux, des pinsons, des sauterelles, des débris sans forme tombaient de tous côtés, et l'état électrique de l'atmosphère produisait une sensation vertigineuse sans analogue dans nos souvenirs, se manifestant par un état extraordinaire d'exaltation chez quelques hommes habituellement très calmes » (1).

Le cyclone des Barbades, du 10 août 1831, nous offre un exemple remarquable de manifestations électriques. Il fut annoncé par des éclairs d'une grandeur effrayante. La foudre éclatait dans toutes les directions et sans interruption ; une heure après, le cyclone était dans toute sa force : « Peu à peu, dit Reid, les éclairs cessaient en même temp

(1 *Trombes et Cyclones*, Zurcher et Margollé, p. 252.

que le vent et la ville demeura plongée dans une obscurité effrayante. On vit tomber du ciel plusieurs météores enflammés ; l'un d'eux, de forme sphérique et de couleur rouge, parut descendre verticalement d'une grande hauteur ; en s'approchant de la terre, il devint d'une blancheur éblouissante, sa forme s'allongea, et en tombant sur le sol, il se divisa en mille fragments, puis s'éteignit soudain..... Les éclairs qui, à part de courts et rares intervalles, n'avaient cessé de sillonner le ciel, se montrèrent avec une vivacité et un éclat extraordinaires couvrant pendant une demi-heure tout l'espace compris entre la terre et les nuées. L'immense masse de vapeurs semblait toucher les toits des maisons et lancer vers la terre des flammes que celle-ci lui renvoyait aussitôt. Immédiatement après cette singulière pluie d'éclairs, l'ouragan souffla de nouveau avec une prodigieuse violence défiant toute description et chassant devant lui des milliers de débris arrachés sur sa route. Les maisons les plus solides étaient ébranlées jusque dans leurs fondements et le sol trembla sur le passage du fléau destructeur... Le rugissement et les sifflements du vent, le bruit de l'Océan dont les vagues effroyables menaçaient d'engloutir tout ce que l'ouragan laissait debout, le choc des tuiles, la chute des toits et des murs et mille autres bruits confus formaient un fracas horrible, épouvantable... » (1).

A cette description, qui fait ressortir d'une manière si frappante le rôle important de l'électricité, Dove ajoute les lignes suivantes : « Si nous ajoutons que pendant que l'ouragan était dans toute sa force, la tension électrique de l'atmosphère était si grande que des étincelles

(1) *Le Monde physique*, Guillemin, T. V, p. 839.

jaillirent d'un nègre dans le jardin du collège Coddington, nous pouvons admettre avec le général Reid que tous les grands arbres détruits à Saint-Vincent, le furent par la grande quantité d'électricité qui se dégagea pendant cette tempête » (1). Le cyclone des Bermudes de 1862, celui de 1879, le cyclone qui dévasta Louisville le 27 mars 1890... tous présentaient des phénomènes semblables. Les grandes tempêtes tournantes sont donc précédées et accompagnées de manifestations électriques d'une intensité qui n'a d'égale que la violence de l'ouragan lui-même.

Les cyclones se distribuent comme les orages de nos contrées, suivant les mois les plus chauds de l'année, au moment où l'électricité des régions tropicales, accumulée dans l'atmosphère, ne trouve aucun conducteur qui la ramène au sol.

Le tableau suivant, dressé d'après les statistiques des météorologistes, donne une moyenne des cyclones observés en trente-cinq ans :

MOIS	ANTILLES	CHINE	Golfe de BENGALE	Océan INDIEN AUSTRAL
Janvier	6	«	2	12
Février	9	«	3	17
Mars	11	1	6	12
Avril	12	1	6	10
Mai	17	1	20	7
Juin	21	2	8	4
Juillet	40	4	7	2
Août	100	6	8	«
Septembre	85	15	15	1
Octobre	75	12	25	1
Novembre	20	8	20	6
Décembre	5	1	8	8

(1) *Trombes et Cyclones*, Zurcher et Margollé, p. 210.

La concordance qui existe entre les causes, les effets, les manifestations des trombes, tornades, cyclones et orages de toute sorte apparaît de plus en plus confirmée et l'on voit aussi que leur distribution géographique coïncide avec la distribution de l'électricité atmosphérique. Il faut donc en conclure que ce sont des forces intimement liées l'une à l'autre, car c'est dans les pays tropicaux, là où l'électricité acquiert un potentiel incommensurable, que naissent les cyclones et d'où partent les grands mouvements tourbillonnaires à côté desquels s'en forment de plus petits suivant le degré de tension électrique.

Dans nos climats tempérés, on sait que les choses se passent de même, et M. Houzeau notait un maximum de potentiel électrique à l'approche d'un ouragan. M. Gully confirme cette remarque et il constate des manifestations exagérées d'ozone dès qu'un centre de dépression est à proximité (1).

III. Planté nous offre, dans son expérience des nuages d'oxyde formés par un flux d'électricité et tournant sous l'influence d'un électro-aimant, l'image frappante des cyclones distribués dans les deux hémisphères avec leur mouvement de rotation dans un sens déterminé ; dans cette expérience, qui n'est qu'une nouvelle disposition de celle que nous avons déjà citée (2) deux nuages d'oxyde reçoivent chacun une gyration, dont l'une est contraire au mouvement des aiguilles d'une montre au-dessus du pôle boréal et l'autre de même sens au-dessus du pôle austral de l'électro-aimant. Planté, considérant, avec MM. Meldrum, Martinez Ancira et Wilson, que la rotation des courants

(1) *Comptes Rendus de l'Académie des Sciences pour 1878*, T. II, p. 182.

(2) Voir page 82, fig. 15.

atmosphériques s'effectue en spirale, les assimile à des mouvements électro-dynamiques qui se produisent lorsqu'un flux d'électricité s'échappe d'un seul point pour rayonner dans tous les sens au-dessus d'un aimant : « Si l'on remarque en outre, dit-il, que les mouvements gyratoires sont accompagnés de manifestations électriques des plus intenses à leur naissance dans les régions tropicales, et que les cyclones semblent se développer autour d'un point appelé *œil de la tempête*, qui est un véritable foyer d'électricité, il est permis, croyons-nous, d'attribuer ces redoutables météores à la rotation magnéto-dynamique des courants électriques de l'atmosphère, auxquels les nuages servent de conducteurs mobiles et dont le mouvement se communique aux masses d'air qui les entourent » (1).

Cette conclusion, d'après tout ce qui précède, n'a rien qui puisse nous surprendre. Déjà en 1850, Reid et Piddington (2) avaient émis des idées analogues et pensaient que des influences électriques devaient certainement agir sur la formation des cyclones. Et cette influence semble également s'imposer, soit que l'on adopte la théorie des courants descendants de M. Faye ou celle des courants aspiratoires de Mohn, ou bien celle des vents convergents, ou bien encore des vents en spirale, etc...

Au lieu d'invoquer exclusivement la direction des vents réguliers, alizés et moussons, et d'appeler à son aide les lois de la mécanique pour expliquer la marche invariable des cyclones, on en trouve plus facilement la cause dans ces grands courants électriques de l'atmosphère, qui engendrent les cyclones au point même de leur maximum de

(1) *Phénomènes électriques de l'atmosphère*, G. Planté, p. 124.

(2) *Guide des marins*, Piddington, p. 27.

tension et dans une force terrestre de même nature qui les empêche de jamais passer la ligne équatoriale et les dirige vers un point fixe.

IV. Signalons un dernier phénomène qui suit presque toujours les ouragans et qui peut être considéré comme résultant de leur haute tension électrique. Après un cyclone, il se produit sur les côtes éloignées un raz de marée, une seiche, des amoncellements de vagues furieuses qui, sans causes apparentes, déferlent avec violence, envahissent les terres et ajoutent encore aux effets destructeurs des cyclones.

Mohn en donne pour cause la basse pression qui règne au centre de l'ouragan : « La mer s'y élève, tandis que ses eaux sont en même temps repoussées vers le centre par les courants atmosphériques qui affluent de toutes parts en ce point. Lorsque cette marée d'ouragan arrive à une côte, elle peut, jointe à la pluie torrentielle qui tombe pendant la durée du phénomène, inonder tout à coup de grandes étendues de territoire » (1).

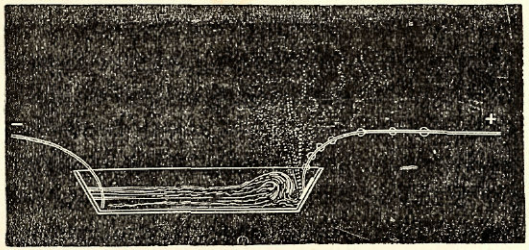

Fig. 77.

L'objection que M. Faye fait à la théorie des courants aspiratoires a ici toute sa force, car on ne peut comprendre qu'une différence de pression de quelques millimètres puisse élever et aspirer une quantité d'eau si prodigieuse. Mais l'électricité peut produire ces raz de marée incroyables, et Planté nous le démontre en soulevant par un flux électrique de haute tension toute l'eau d'un vase en une seule vague qui va frapper les bords dès que cesse le courant (fig. 77). L'électricité naturelle qui afflue au centre d'un cyclone peut donc soulever la mer en montagnes liquides dont les masses vont s'abattre sur les côtes après le passage de l'ouragan.

(1) *Météorologie*, Mohn, p. 387.

V. Nous avons encore à enregistrer une de ces connexions étroites que nous ne cessons de faire remarquer et qui relient entre eux les perturbations terrestres et cosmiques ; nous voulons parler des coïncidences que de nombreux observateurs ont découvertes entre les ouragans et les taches solaires. De Humbolt croyait à l'influence du soleil sur les ouragans, les cyclones et les orages. M. Balfour-Stewart rappelle que Baxendell, de Manchester, fut un des premiers à noter que les centres de dépression de l'atmosphère terrestre semblaient varier suivant l'état de la surface du soleil. A. Poëy était de cet avis, et M. Meldrum a démontré l'existence de cette connexion (1) ; il trouve :

TACHES SOLAIRES	PÉRIODES	NOMBRE DE CYCLONES dans l'Océan Indien
Un maximum.....	de 1847 à 1849	23
Un minimum.....	de 1854 à 1856	13
Un maximum.....	de 1859 à 1861	39
Un minimum.....	de 1865 à 1867	21
Un maximum.....	de 1869 à 1871	31

De plus, le P. Secchi avait mis hors de doute la

(1) *La Nature*, 1881, T. II, p. 163.

concordance des bourrasques et des perturbations magnétiques; enfin, M. Zenger, au sujet du *fœhn* de Suisse, qu'il assimile aux cyclones et auquel il donne une origine cosmique, résume dans les lignes suivantes toutes ces coïncidences : « En tenant compte, dit-il, du principe énoncé par moi du parallélisme des grandes perturbations, ne doit-on pas admettre que le fœhn, une fois reconnu comme un mouvement cyclonique, ne peut être que lié aux deux principales causes des perturbations atmosphériques, des orages électriques et magnétiques, à savoir : les perturbations solaires et les perturbations produites par les essaims d'étoiles filantes. La différence énorme de potentiel électrique entre l'électricité solaire et celle de la terre doit donner naissance à des décharges continuelles produisant les trombes électriques, etc... »

M. Zenger a dressé des tableaux et comparé les jours de fœhn en Suisse, de 1856 à 1873, avec les périodes de perturbations solaires, les essaims d'étoiles filantes et les aurores boréales ; il en a rapproché également les mouvements séismiques, la chute des bolides et les éruptions volcaniques; l'inspection de ces tables l'a conduit à ces conclusions : « Que les décharges de l'électricité cosmique vers la terre produisent des tornades électriques; c'est ainsi que prennent naissance les cyclones, qui sont, par leur mouvement descendant, l'origine du fœhn, des aurores boréales, des orages électriques et magnétiques, des courants terrestres et des mouvements séismiques qui accompagnent les tempêtes dangereuses » (1).

(1) *Comptes Rendus de l'Acad. des Sciences pour 1886*, T. II, p. 1215.

CHAPITRE VI

TREMBLEMENTS DE TERRE

Les volcans ont leurs phénomènes électriques et nous avons décrit sommairement les orages volcaniques qui se forment avec les éruptions et proviennent d'un flux d'électricité dégagé par le cratère avec les laves et les vapeurs qu'il vomit. Ce seul fait, sans parler d'une foule d'autres, nous laisse deviner les changements, les modifications, les bouleversements, les combinaisons incessantes qui s'effectuent sous nos pieds ; l'intérieur de notre globe est continuellement agité par de nombreuses et diverses perturbations forcément productrices d'électricité, dont les manifestations nous apparaissent comme le principe de nouveaux phénomènes. Pourquoi donc les tremblements de terre seraient-ils oubliés? Ils doivent nécessairement prendre place dans cette nomenclature des perturbations naturelles qui ont ou des effets ou des causes électriques ; car soit qu'on les rattache tous, ce qui semble bien difficile, aux phénomènes volcaniques, soit qu'on admette des divisions et des catégories dans leurs caractères, les tremble-

ments de terre sont souvent accompagnés de phénomènes électriques et presque toujours annoncés par des courants telluriques d'une intensité extraordinaire.

Les relations qui existent entre les tremblements de terre et l'électricité, affirmées d'abord il y a fort longtemps, ont été niées ensuite, et sont enfin reconnues aujourd'hui ; mais les météorologistes n'accordent pas à cette question toute l'importance qu'elle nous semble avoir. En effet, rappelons-nous ici que l'on n'hésita pas à donner une origine électrique aux aurores polaires, dès que l'on eût constaté une coïncidence constante entre elles et les courants terrestres. La séismologie prend actuellement une grande extension, la météorologie *endogène*, comme l'ont appelée MM. Palmieri et de Rossi, devient le complément de la météorologie atmosphérique et bientôt, nous le croyons, on devra reconnaître que l'électricité est dans la terre une force aussi puissante et aussi active que dans l'atmosphère.

Nous nous trouvons donc amenés à parler d'abord des courants telluriques et des variations du magnétisme terrestre, nous indiquerons quelques-unes des nouvelles observations qui ont été présentées à ce sujet, en renvoyant à des traités spéciaux pour l'étude générale du magnétisme.

I. Courants telluriques et variations du magnétisme terrestre

Admise par les uns, repoussée par les autres, la théorie d'Ampère sur le magnétisme terrestre n'a pu recevoir encore de sanction expérimentale ; elle avait cependant l'avantage de rejeter au rang des fables la supposition quelque peu hasardée d'un aimant terrestre central. Ampère supposait la terre sillonnée par des courants dirigés de l'est à l'ouest, réglant la direction de l'aiguille aimantée et il expliquait ses variations diurnes et annuelles par la hauteur du soleil sur l'horizon et sa situation dans l'écliptique. Cette théorie reste à l'état d'hypothèse, suivant plusieurs météorologistes, en ce sens que l'on n'a jamais pu s'assurer de la marche invariable de ces courants. Il sera toujours bien difficile, d'ailleurs, de vérifier leur présence constante car, s'ils existent, ils traversent et remplissent tous les corps terrestres et ne peuvent guère se révéler qu'au moment d'une brusque variation ou d'un changement de direction. Et précisément, ce que l'on a constaté c'est la présence momentanée des courants telluriques que certains physiciens veulent distinguer du magnétisme terrestre et qui varient d'intensité et de direction avec les perturbations terrestres ou atmosphériques : orages, cyclones, aurores polaires, taches solaires, essaims d'étoiles filantes, tremblements de terre...

D'après les recherches du professeur Walker dans les Indes : « on a remarqué que, par les jours agités, les courants de la terre se renversent en quelques minutes mais que, au moins sur une étendue de 900 milles, ces renversements concordent tous, c'est-à-dire que tous les endroits *est* sont positifs ou négatifs en même temps et que les endroits *ouest* sont simultanément de signe contraire. Une grande surface est affectée de la même manière au même moment. De fortes secousses ressemblant au battement du pouls dans le corps humain se font sentir et augmentent ou diminuent les courants sur toutes les lignes en même temps (1) ».

(1) *Ciel et Terre* et *Revue Intern. de l'Elect*, T. V, p. 4.

De nombreux savants ont recherché quelle pouvait être la cause de ces courants telluriques d'intensité si variable. Le major Sabine le premier, puis MM. Ayrton, Perry, Will Ellis ont pensé qu'ils résultaient d'une induction des taches solaires et les statistiques qu'ils ont dressées concordaient toutes. Le colonel d'artillerie Pariset les croyait engendrés par le frottement d'un ménisque mobile incandescent contre la croûte terrestre (1). Selon M. Lagrange, les courants telluriques sont produits directement par le soleil et déviés par l'action magnétique de la terre (2) ; il conclut à l'existence dans l'atmosphère et dans la terre de courants allant *de l'est à l'ouest* qui s'abaissent pendant la saison chaude sous la surface terrestre pour se relever pendant la saison froide (3).

M. Sélim Lemström considère lui aussi une suite de courants magnétiques terrestres dont la résultante placera l'aiguille aimantée dans l'axe de rotation du globe. Car si, d'après les géologues, la croûte terrestre refroidie, épaisse d'environ 50 à 60 *kilom.* contient environ 2 o/o de fer et si l'on imagine que toutes les molécules magnétiques soient concentrées sur une même couche à l'intérieur de la croûte, on aura une couche de matières magnétiques d'une épaisseur de 1 *kilom.* qui, d'après M. Lemström, est aimantée par des courants provenant de la rotation de la terre dans l'espace. « La terre, dit-il, étant un corps magnétique traversant un espace d'éther doit s'aimanter, parce que les choses se passent au point de vue du magnétisme à peu

(1) *Recherches sur les courants telluriques,* Pariset, 1862, p. 17.

(2) *Comptes Rendus de l'Acad. des Sciences pour 1887.* T. I. Séance du 9 mai.

(3) *Comptes Rendus de l'Acad. des Sciences pour 1887,* T. I. Séance du 16 mai.

près comme si la terre restait en repos et si l'espace éthéré tournait en sens contraire. Si l'on imagine la terre divisée en une infinité de couches minces normales à l'axe, on peut choisir à volonté une de ces couches et y considérer un point quelconque. Choisissons la couche équatoriale et le point *q* situé dans la couche magnétique *a* que nous supposons composé d'aimants moléculaires. Quand l'aimant moléculaire *q* se déplace dans la direction *de l'ouest à l'est*, par suite de la rotation de la terre, d'un petit chemin *ds*, il se produira un effet semblable à celui qui proviendrait de ce que la terre restant en repos, les molécules d'éther parcourraient un chemin — *ds* dans *une direction opposée* dans le plan, d'où proviennent une infinité d'éléments de courants qui agissent sur l'aimant moléculaire (1) ».

M. Lemström ne parle ici que du magnétisme terrestre et cependant on voit que ses observations et celles de M. Lagrange se rapprochent jusqu'à un certain point de l'hypothèse d'Ampère. Quoiqu'il en soit, bien des météorologistes veulent donner à l'existence des courants telluriques soit une cause cosmique, soit une cause atmosphérique et les déclarent complètement indépendants de l'action constante du magnétisme terrestre, tout en reconnaissant que les variations de ce magnétisme coïncident souvent avec l'apparition des courants ; c'est l'avis de MM. Blavier, Balfour-Stewart et Schuster. M. Blavier dit à ce sujet : « Les variations accidentelles du magnétisme terrestre auxquelles sont liés intimement les courants telluriques sont probablement indépendants du magnétisme propre de notre globe dont l'origine encore inconnue a été attribuée

(1) *Comptes Rendus de l'Acad. des Sciences pour 1880,* T. II, p. 223.

à un aimant, puis, par Ampère, à des courants circulant de l'est à l'ouest (1) ».

Balfour-Stewart rappelle que Georges Airy n'a pas trouvé de ressemblance sensible entre la marche régulière de l'aiguille aimantée et celle des courants telluriques. Mais il faut faire remarquer que Airy trouve aussi « qu'il est impossible, en considérant la concordance entre les courbes qui indiquent la marche du phénomène, de ne pas conclure que les perturbations magnétiques ont leur cause dans les courants galvaniques de la terre au-dessous de l'aimant (2) ». Balfour-Stewart voit la cause des variations de l'aiguille dans les régions atmosphériques supérieures « et, dit-il, la fréquence des variations magnétiques au moment du maximum des taches solaires peut être invoquée à l'appui de cette supposition (3) ».

M. Duponchel fait dériver les variations séculaires de l'aiguille aimantée de l'action prépondérante d'une planète ultra-neptunienne, la planète *Océan* dont la durée de révolution est de 647 ans (4).

M. Landerer, qui a étudié les variations des courants telluriques à l'aide d'un électromètre de M. Mascart, affirme au contraire qu'il faut chercher la cause du magnétisme terrestre dans une électrisation constante de la terre et que le siège des forces mises en jeu est au-dessous de l'aiguille et non au-dessus, comme le pensent MM. Blavier et Balfour-Stewart. Car, pour M. Landerer, le vent électrise

(1) *Etude sur les courants telluriques*, Blavier, 1884, p. 11.
(2) *Etude sur les aurores boréales*. Lemstrom, p. 77.
(3) *Phys. Society*, Londres, 1886. Séance du 30 avril. – *Rev. Int. de l'Elect.* T. III, p. 29.
(4) *Comptes Rendus de l'Acad. des Sciences pour 1884*, T. II, p. 719.

la terre et on doit chercher un régime des vents qui par la persistance de son action soit en rapport avec l'allure générale du phénomène qu'il s'agit d'expliquer. Or, parmi ces régimes, il en est deux qui remplissent les conditions requises, à savoir les alizés et les moussons : « Pour les alizés il est aisé de voir, dit-il, que la résultante des courants telluriques est dirigée *de l'est à l'ouest*. C'est elle qui, sur l'Atlantique, régit l'orientation nord-sud de l'aiguille. Sur nos contrées, c'est l'action de l'alizé nord qui tend à

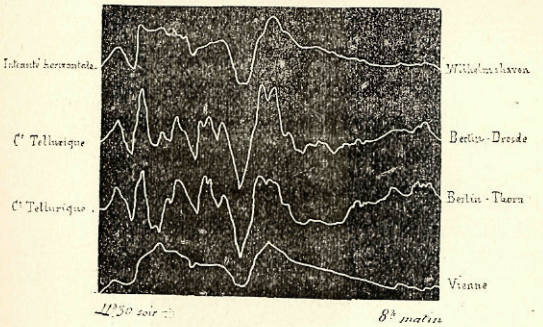

Fig. 78.

prévaloir, d'où il suit que le pôle boréal de l'aiguille doit dévier vers l'est (1) ». M. Landerer a remarqué de plus que l'intensité des courants électriques n'est pas modifiée par le passage d'un nuage et il en conclut encore que ces courants ne résultent pas d'une induction, mais que c'est un courant propre à la terre. MM. Leod et Adam partagent cet avis.

D'un autre côté M. Heisig, secrétaire de la direction supérieure des postes allemandes, a observé les courants telluriques et les variations de la déclinaison, de l'intensité

(1) *Comptes Rendus de l'Acad. des Sciences pour 1886*, T. II. Séance du 16 août.

horizontale et de l'intensité totale du magnétisme terrestre et il trouve un parfaite concordance (1).

1° Entre les variations du courant tellurique et celles de la déclinaison du magnétisme terrestre relevées le 2 novembre 1884 (fig. 78);

2° Entre les variations du courant tellurique et celles de l'inclinaison horizontale du magnétisme terrestre; (fig. 79);

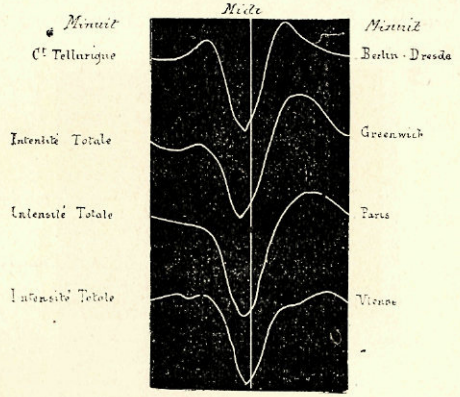

Fig. 79.

3° Entre la marche quotidienne du courant tellurique et celle de l'intensité totale du magnétisme terrestre en 1884 (fig. 80).

Enfin, les conclusions de M. Batelli, dans son rapport au Bureau central italien, pour la météorologie de 1889, tendent à prouver que les variations du courant tellurique précèdent de quelques minutes celles des éléments du magnétisme terrestre ; ses observations semblent lui indiquer une liaison intime entre ces deux phénomènes.

(1) *Société Electrotechnique de Francfort-sur-Mein*, 1886. Séance du 8 novembre — *Rev. Int.* T. IV, p. 124.

M. Keller ajoute à ces diverses causes certaines influences particulières des terrains (1).

Il faut encore compter avec la théorie de Seebeck qui considère les courants terrestres engendrés par la chaleur interne du globe : L'enveloppe de la terre étant traversée dans tous les sens par des filons métalliques ; chaque fois qu'il existera une différence de température entre deux points, il y aura production de courants et justement la

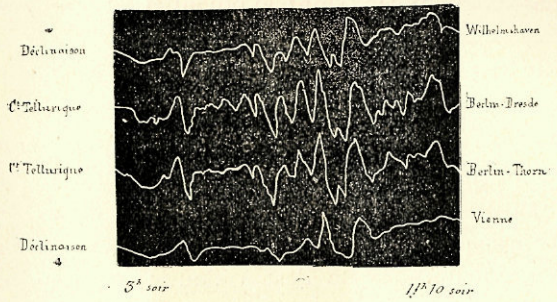

Fig. 80.

position de l'équateur magnétique est indiquée par la zone minérale la plus considérable (2).

Becquerel pensait aussi que les courants terrestres avaient une origine calorifique (3).

Enfin, d'après un compte rendu analytique de M. Lourme : « étant donné que les variations de température et les actions chimiques produisent toujours une fluctuation électrique, il n'est pas étonnant que la masse du

(1) *Acad. reale dei Lincei, Roma*, 1886. Séance du 16 mai.
(2) *Exposé de la théorie de Seebeck*, par M. de la Foye, prof. de phys. — *Acad. des Sciences de Caen*, 1827, p. 119.
(3) *Traité de l'Electricité et du magnétisme*, Becquerel, T. III, p. 162.

globe soit parcourue par des courants souvent forts et puissants (1) ».

Pour M. Lecher, des expériences ont établi que la terre possède un état électrique dont le potentiel est d'environ 4,000 millions de volts ; mais cet état ne se manifeste pas dans tous les corps reliés à la terre et qui ont le même potentiel ; « aussi, on continue à dire que ces corps ne sont pas électrisés. » Il nomme corps électrisés positivement ceux qui possèdent un potentiel plus élevé, et corps électrisés négativement ceux dont le potentiel est moindre (2).

Toutes ces recherches nous conduisent à penser qu'il est difficile de séparer les courants telluriques du magnétisme terrestre et qu'il est même possible de voir un seul phénomène dans ces deux manifestations ; que l'hypothèse d'Ampère pourrait bien être la loi qui régit l'orientation de l'aiguille aimantée, puisqu'on a des preuves de courants telluriques circulant avec une grande intensité dans les régions équatoriales de l'est à l'ouest, et dont on peut considérer la direction comme réglée par la rotation de la terre en face du soleil. Quant aux variations magnétiques régulières ou brusques et irrégulières, elles sont probablement dues, les unes à des influences cosmiques, les autres aux perturbations terrestres et extra-terrestres de toutes sortes qui produisent, sur les appareils sensibles, ces mêmes phénomènes d'induction que nous avons fait remarquer pendant les orages atmosphériques.

La terre doit être électrisée dans tout son ensemble par suite des réactions chimiques et des grandes différences de températures qui ne cessent de s'y produire. Une partie de cette

(1) *Bulletin de la Société des Etudes indo-chinoises de Saïgon* p. 175.

(2) *Société électrotechnique de Vienne*, séance du 20 janvier 1890.

électricité, comme nous l'avons vu dans notre premier chapitre, s'élève dans l'atmosphère et son potentiel y est réglé par les différences de condensation et de conductibilité. Quant à la terre, des courants puissants la sillonnent

Fig 81.

et ils s'y distribuent avec une intensité qui varie suivant la constitution des corps traversés.

II. Caractères principaux des tremblements de terre

Comme les orages qui ne cessent d'ébranler l'atmosphère

de leurs décharges répétées sur un point ou sur un autre, il ne se passe pas d'instant où l'enveloppe terrestre ne soit agitée plus ou moins violemment par des secousses séismiques. Tantôt ce sont de légères oscillations de peu de durée, qui ne sont ressenties que par un petit nombre d'observateurs ; d'autres fois ce sont de longues ondulations qui partent d'un point appelé *foyer d'ébranlement*

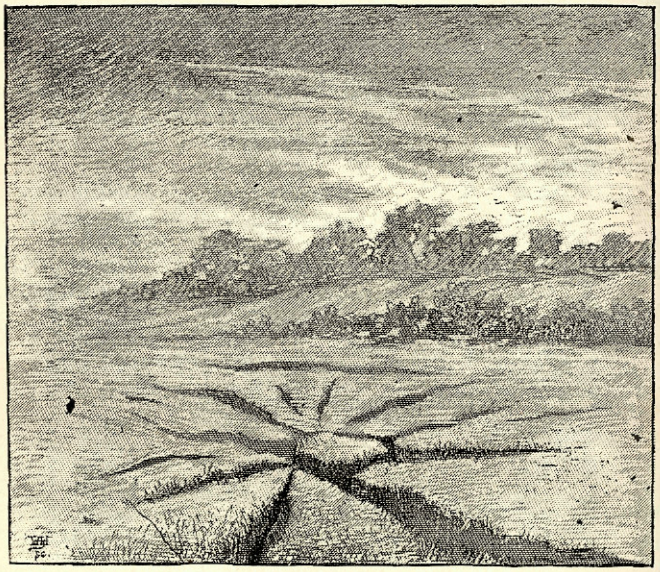

Fig. 82

pour s'en aller, en diminuant, dans une direction définie ; ou bien encore, il se produit des secousses verticales, des froissements, des déchirements internes qui se font sentir tout d'un coup ici et là sans que l'on puisse y relever rien de précis. Des crevasses se forment rectilignes (fig. 81) ou étoilées (fig. 82), les maisons s'affaissent, les édifices s'écroulent,

des villages, des villes entières disparaissent en n'offrant plus qu'un monceau de ruines informes, et le tremblement de terre s'est fait au milieu d'un fracas de décharges souterraines, de détonations retentissantes et de sourds grondements. Les populations fuient éperdues sans savoir où se réfugier en présence d'un tel cataclysme, qui peut, à chaque instant, ouvrir le sol à l'endroit même où l'on voudrait se croire en sûreté.

Le tremblement de terre mémorable qui détruisit Lisbonne le 1^er^ novembre 1755 ne dura qu'un instant ; trois secousses formidables renversèrent la ville en quelques secondes et ensevelirent plus de 60,000 personnes sous les décombres. Dans la Calabre, en 1785, plusieurs villes et villages furent ruinés : la terre s'entr'ouvrit en longues crevasses tantôt bifurquées, tantôt isolées, dont quelques-unes restèrent béantes ; les autres se refermèrent brusquement en broyant entre leurs parois les maisons et les hommes qui y avaient glissé. En 1797, les Andes furent bouleversées par des tremblements de terre qui dépassèrent encore en violence ceux de la Calabre, déjà si terribles. Des météores étranges apparurent dans les airs tandis que Riobamba et une foule d'autres villes étaient renversées.

Nous ne rappellerons pas les grands tremblements de terre si fréquents au Chili, à Cuba, au Japon... et ceux, tant de fois décrits, qui ont désolé l'Espagne en 1884 et les côtes de France et d'Italie en 1887, où ils firent de nombreuses victimes à Diano-Marina en particulier.

Le bruit qui caractérise les tremblements de terre a été comparé bien des fois à celui du tonnerre. Ce sont des détonations violentes et saccadées ou des roulements, des grondements sourds et prolongés qui vont en s'éteignant. Ces détonations sont souvent suivies d'une sorte de frémis-

sement qui se communique aux couches voisines et se transmet ainsi au loin. Nous devons cependant faire remarquer que parfois le bruit, au contraire, va en augmentant ; nous en avons la preuve dans une note de M. Stanislas Meunier sur le tremblement de terre du 23 février 1887, à Nice : « Au moment du phénomène, dit-il, je me trouvais à Nice, à la station agronomique des Alpes-Maritimes. Déjà réveillé et encore couché, j'entendis d'abord, à 6 *h.* 43 *m.*, comme un frémissement venant de loin, auquel je n'attachai pas d'importance ; il grandit rapidement, prit les proportions du roulement d'une brouette, puis d'une voiture lancée avec une vitesse de plus en plus grande ; il acquit bientôt une intensité épouvantable, rappelant les éclats du tonnerre. En même temps, toute la chambre se mit à vibrer ; les vitres, les portes ajoutèrent leur note au concert et sans confusion avec le premier bruit ; il y eut quelque chose d'analogue à l'assourdissant vacarme qu'on entend dans un omnibus presque vide. Subitement, mon lit se mit en mouvement, d'abord des pieds vers la tête, puis transversalement, de mon pied droit à mon épaule gauche, et je ressentis une quinzaine de chocs rapides donnés comme avec fureur alternativement dans deux sens opposés. C'est seulement à ce moment que je me rendis compte de la cause du phénomène. J'entendis ensemble les bruits de la rue, les hurlements de nombreux chiens, la chute de lourds matériaux et le frôlement contre les fenêtres des bambous du jardin, bien qu'il n'y eût pas de vent... L'accroissement successif du bruit souterrain me semble avoir un grand intérêt au point de vue de la théorie » (1).

(1) *Comptes rendus de l'Acad. des Sciences pour 1887*, T. V, p. 651.

Au moment du tremblement de terre de Lisbonne, en 1755, un bruit de tonnerre retentit et une secousse renversa la ville. En 1797, le tremblement de terre des Andes ne fut accompagné d'aucun bruit souterrain, une formidable détonation désignée, par ces seuls mots : *el gran ruido*, se produisit seulement 18 minutes après sous les deux villes de Quito et d'Ibarra et ne fut entendue ni à Tacunga, ni à Hambato, ni sur le théâtre même du désastre (1). Les secousses séismiques qui agitèrent le Canada en 1877 furent accompagnées d'un bruit sec ressemblant au choc de deux locomotives. Pendant les perturbations de 1879 en Italie, on entendit des décharges semblables au bruit du canon. En 1880, en Hongrie, le sol oscillait au milieu de sourds grondements identiques à ceux du tonnerre (2). Le 8 mars 1883, dans le département de la Mayenne, la secousse a été immédiatement suivie d'un long bruit souterrain que l'on compara généralement, comme sonorité, à un coup de tonnerre assez rapproché (3).

C'est encore un bruit de charrettes ou de trains roulant sur des ponts de fer, et Humbolt l'assimile à un cliquetis de chaînes entrechoquées. Nous retrouvons enfin partout les mêmes comparaisons que pour le tonnerre, les trombes ou la grêle.

On a cherché à déterminer la vitesse de propagation du bruit des tremblements de terre et celle de la transmission des secousses. Il semble ressortir, des expériences de M. Fouqué, que le bruit s'éteint avec rapidité (4). Quant

(1) *Volcans et Tremb. de Terre*, Zurcher et Margollé.

(2) *La Nature, 1881*, T. I, p. 79.

(3) *Comptes rendus de l'Acad. des Sciences pour 1883*, T. I, p. 869.

(4) *Comptes rendus de l'Acad. des Sciences pour 1886*, T. I. Séance du 7 juin).

aux ondulations, elles se transmettent, d'après le professeur Newcamb, avec une vitesse de 5,184 *m.* à la seconde, mais on ne peut rien affirmer de bien exact.

L'étendue de la surface agitée est très variable ; on se trouve en présence de bizarreries inexplicables et quelquefois les secousses séismiques se font sentir à des distances fort éloignées les unes des autres sans que les régions intermédiaires soient ébranlées, ce qui doit être plutôt l'effet d'un contre-coup, une sorte de choc en retour. Enfin, le tremblement de terre peut se localiser dans un espace restreint. Les secousses qui ont agité fréquemment l'île d'Ischia, comme, par exemple, le 2 février 1828 et le 28 juillet 1883, ne s'étendirent pas même aux îles voisines, tandis que le 17 juin 1826, à la Nouvelle-Grenade, plusieurs milliers de myriamètres carrés ressentirent en même temps un tremblement de terre ; celui de Variste, dans le Sonora, en 1887, se transmit au même instant à Mexico, à 3,000 *kilom.* (1). Le tremblement de terre de Lisbonne fut encore plus étendu. On en ressentit les effets depuis la Laponie jusqu'à la Martinique, depuis le Groënland jusqu'au Maroc, où Fez et Mequinez furent détruits. L'Europe entière fut agitée en même temps.

Comme après les cyclones, on voit apparaître, pendant les tremblements de terre, des raz de marée, des seiches. En 1755, le port de Setubal, voisin de Lisbonne, fut submergé par une vague énorme. Les hautes murailles de Cadix furent emportées par la mer, qui s'éleva subitement à plus de 20 *m.* au-dessus de son niveau ordinaire. En 1785, le prince de Scylla avait persuadé à ses sujets de se réfugier dans leurs barques pour fuir le tremblement

(1) *Comptes rendus de l'Acad. des Sciences pour 1887*, T. II. (Séance du 15 juillet).

de terre ; mais la mer s'éleva soudain de 6 *m.* et se précipita sur le rivage, entraînant les bateaux, qui furent coulés à fond et brisés sur les roches. On en trouva plusieurs à une grande distance dans les terres (1). Le 9 mai 1877, les côtes du Pérou et du Chili furent envahies par une succession de vagues d'une hauteur extraordinaire qui se firent sentir sur une grande partie de l'Océan Pacifique (2). Dans une circonstance analogue, en 1880, le lac de Genève se souleva en une seule vague au moment de la secousse (3).

M. Forel, qui a recherché la cause de ces phénomènes, pense qu'un ébranlement est alors communiqué à l'eau comme si l'on faisait osciller une cuvette pleine, et il étend son raisonnement aux mêmes effets produits par les orages atmosphériques : « Toutes les fois, dit-il, qu'un temps orageux amène des ruptures dans l'équilibre de l'atmosphère, nous voyons devenir très fortes les seiches qui étaient nulles ou presque nulles par des temps calmes, et lorsqu'un orage soudain vient frapper notre vallée, les enregistreurs nous montrent des seiches commençant subitement à l'instant même du début de l'orage » (4). Si l'on admettait la théorie de M. Forel, elle servirait à établir une analogie remarquable entre les orages atmosphériques et les tempêtes séismiques.

Des sources abondantes, des jets d'eau intenses ont souvent jailli tout d'un coup du sol au moment d'un tremblement de terre. Ce phénomène curieux peut quelquefois s'expliquer par des effondrements ou des dislocations qu

(1) *Volcans et Tremb. de Terre*, Zurcher et Margollé, p. 267.
(2) *La Nature*, 1877, T. II, p. 116.
(3) *La Nature*, 1880, T. II, p. 94.
(4) *La Nature*, 1878, T. I, p. 259.

auraient changé le cours des rivières souterraines, mais lorsque ces causes paraissent trop problématiques, il est permis de rappeler que la foudre a souvent produit des effets mécaniques semblables et que l'on a fréquemment observé des jets d'eau qui jaillissaient d'un lac ou d'une pièce d'eau quelconque sous l'effort aspiratoire de décharges atmosphériques (1).

Entre le 35e et le 40e degré de latitude Nord se trouvent les régions habituellement agitées par les tremblements de terre : c'est à dire le midi de l'Espagne, l'Italie, la Grèce, la Perse, le Japon, la Californie, le Texas, et, dans l'hémisphère sud, le Chili et le Pérou. Certains points particuliers du globe semblent voués, pour ainsi dire, à ces perturbations ; elles sont incessantes à Lima, qui a été détruite ou dévastée plus de dix fois en un siècle ; la Calabre, Ischia pour l'Italie, l'Andalousie pour l'Espagne, sont spécialement le théâtre de semblables catastrophes.

III. Théories des tremblements de terre

Après un tremblement de terre, on examine soigneusement les fissures des maisons, la position des objets tombés ou déplacés et on peut alors quelquefois se rendre compte du sens et du caractère des oscillations. Pour en décrire tous les détails, on a recours à un appareil sensible, au séismographe qui, par la chute d'une boule placée en équilibre instable, par exemple, avertit de la moindre secousse; il trace même, sous l'effet des ondulations, des courbes

(1) *Lumière électrique, 1886*, T. XIX. p. 215 ; *Phén. élect. de l'atm.*, G. Planté, p. 191 ; *La Nature, Chronique météorologique*, 21 juin 1890 et *Le monde physique*, A. Guillemin, T. V, p. 656.

représentant les diverses phases du tremblement de terre. On obtient ainsi, il est vrai, la direction générale des oscillations quand les secousses sont faibles ; mais, quelque parfaits que soient les appareils de M. Palmieri ou de M. Ignacio Galli, on a le plus souvent des enchevêtrements de lignes qui se croisent, se mêlent à un tel point qu'on ne peut relever de leurs indications rien d'exact ni rien de précis. La meilleure méthode pour étudier les tremblements de terre est de recueillir avec soin tous les faits qui les accompagnent, même les plus insignifiants en apparence.

Les tremblements de terre furent d'abord et longtemps considérés comme une conséquence des éruptions volcaniques. Aujourd'hui les météorologistes, à part quelques-uns, séparent les tremblements de terre des volcans et reconnaissent que dans certains cas ces phénomènes ont des caractères tout à fait distincts. Il est évident que les secousses, les trépidations du sol qui se produisent au moment d'une éruption ne peuvent être confondues avec les oscillations ondulatoires ou tournoyantes ressenties dans les régions où il n'existe aucun volcan actif.

Mallet, le géologue, voit dans les éruptions sous-marines l'agent principal de production des tremblements de terre les plus violents ; une éruption qui se manifeste sous la mer doit ouvrir dans les rochers d'énormes fentes ou fissures à travers lesquelles l'eau arrive jusqu'à la masse ignée, des vapeurs se forment avec explosion et c'est ainsi que des tremblements de terre peuvent s'étendre dans toutes les directions. Poulett-Scrope s'appuie aussi sur l'existence d'un noyau central incandescent et pense que les dilatations subites des masses minérales chauffées par ce foyer intérieur produisent des déchirements en même

temps que des secousses ondulatoires. M. Daubrée admet comme principe des tremblements de terre l'infiltration lente des eaux à travers les porosités des roches jusqu'à la matière ignée (1). Puis ce sont des éboulements intérieurs suivant Boussingault.

M. Lallemand explique les tremblements de terre par le retrait de l'écorce terrestre qui se contracte pour rester en contact avec le noyau liquide incandescent et il démontre que la terre tend à prendre la forme d'un tétraèdre régulier, forme qui lui est imposée par le minimum de contraction qui embrasse le plus petit volume possible sous une surface donnée. M. Lallemand essaie de prouver que la structure des continents confirme sa proposition et que les tremblements de terre ne sont ressentis qu'aux points qui avoisinent les arêtes et les sommets du tétraèdre (2).

M. de Parville croit à l'influence exercée par les astres et la lune (3). De même MM. Alexis Perrey, Valger... ont cherché des causes extra-terrestres et M. Delauney pense que les secousses séismiques sont dues au passage des deux planètes Jupiter et Saturne à travers les essaims cosmiques et il signale comme époques particulièrement agitées : 1883, 1886, 1890, 1891, 1900 et 1901 (4). Jusqu'ici ces prédictions se sont en partie réalisées ; est-ce seulement une simple coïncidence comme l'assure M. Faye ?

M. Fuchs divise les tremblements de terre en deux grands groupes qu'il appelle : le premier, groupe des

(1) *Comptes rendus de l'Acad. des Sciences pour 1861*, T. I. (Séance du 21 janvier).

(2) *La Nature*, 1887, T. I, p. 346.

(3) *Comptes rendus de l'Acad. des Sciences pour 1887*, T. I, p. 76.

(4) *Comptes rendus de l'Acad. des Sciences pour 1879*, T. II, p. 844.

tremblements de terre volcaniques et le second, groupe des tremblements de terre non volcaniques ; il donne pour cause à ces derniers les mouvements mécaniques de certaines portions de la masse solide du globe comme dérangements, affaissements ou glissements des couches et il ajoute : Tout ce qui peut donner naissance à de tels changements peut aussi provoquer des tremblements de terre (1).

M. A. Guillemin distingue les légères ondulations des grandes secousses ; il se range pour ces dernières à l'avis des géologues qui font intervenir la masse ignée centrale. Mais il suppose que les faibles ondulations séismiques sont dues à l'action des mouvements atmosphériques, aux brusques variations de pression qui précèdent ou accompagnent les grandes perturbations de l'air : « Quand le baromètre monte ou descend, dit-il, il en résulte un subit accroissement ou une diminution du poids de l'enveloppe fluide qui doit se traduire par une oscillation des couches élastiques sur lesquelles l'atmosphère repose (2) ».

M. A. Heim, professeur à Zurich, distingue trois classes principales :

1° Les tremblements de terre volcaniques dont le centre d'ébranlement est le volcan et qui sont causés par l'effort graduel des masses de l'éruption et spécialement des vapeurs qui s'échappent des laves en ébullition ;

2° Les tremblements de terre d'effondrement causés par l'écroulement des cavernes souterraines ; leurs secousses sont peu violentes et locales.

3° Les tremblements de terre de dislocation, qui sont les plus nombreux ; ce sont des phénomènes de tassements ou

(1) *Volcans et tremblements de terre*. Fuchs, 1887. p. 644 et 650.

(2) *Le Monde physique, Météorologie*, Guillemin, T. V, p. 714.

de glissements de la croûte terrestre qui se déplace et s'ébranle plus ou moins violemment (1).

En somme, il faut faire de nombreuses distinctions, car il ne nous semble guère possible de généraliser complètement la théorie des tremblements de terre et d'admettre une seule cause pour expliquer des phénomènes si divers dans leurs manifestations et leurs effets.

Nous avons vu apparaître dans ces dernières théories, les influences cosmiques ou atmosphériques. Ce serait peut-être une première raison pour faire intervenir l'électricité terrestre et cosmique dont nous avons reconnu la présence active. Signalons donc les phénomènes qui viennent à l'appui de cette hypothèse et nous verrons qu'il faut admettre des causes électriques dans les tremblements de terre.

IV. Phénomènes atmosphériques

Bien que l'on ait essayé de nier toute liaison entre l'état de l'atmosphère et les tremblements de terre, ce rapprochement nous paraît cependant évident, à moins de mettre de côté certains faits résultant d'observations attentives et qui le prouvent entièrement. D'ailleurs les affirmations sont plus nombreuses que les négations ; Piddington observa des coïncidences entre les ouragans et les tremblements de terre (2) et Reid affirme que les concordances sont très fréquentes entre les perturbations atmosphériques et les secousses séismiques. Nous avons vu aussi, dans le précédent chapitre (3), que M. Zenger avait été frappé

(1) *La Nature*, 1888, T. II, p. 38.
(2) *Guide du marin*, H. Piddington, p. 677.
(3) Voir p. 340

de la relation des perturbations atmosphériques et terrestres au nombre desquelles se trouvaient les tremblements de terre qu'il considérait comme dérivant souvent des cyclones. M. de Rossi écrivit de Rome le 9 février 1878 que le 25 et le 26 janvier, la grande bourrasque atmosphérique avait été accompagnée en Italie de petites secousses et que celles-ci ont été les précurseurs du tremblement de terre qui a éclaté deux jours après dans la Manche. Il ajoute que le niveau des lacs souterrains se trouve particulièrement influencé par les tempêtes atmosphériques et les tempêtes séismiques.

M. de Rossi montre enfin l'influence des troubles atmosphériques sur les tremblements de terre et la relation intime qui existe entre l'état de l'atmosphère et celui de la terre (1).

M. de Lacerda a dressé des tableaux qui font, de plus, ressortir d'une manière frappante la concordance des tremblements de terre et des taches solaires. Nous remarquons aussi que les nombreuses secousses de juillet 1883, à Java, à Ischia et celles d'octobre en Algérie et à Smyrne, ont coïncidé avec un maximum de taches solaires observé à la même époque.

Ces dépendances s'affirment encore davantage si l'on ajoute aux relations générales des observations particulières.

En 1797, on vit à Quito un prodigieux passage d'étoiles filantes peu de temps avant la première secousse ; le même phénomène avait précédé le tremblement de terre de Cumana en 1766 et Humbolt rappelle à ce sujet que la pointe du Cayanhe avait paru la nuit enveloppée d'une pluie de météores. En 1861, dans des circonstances analogues, à

(1) *La Nature*, 1878, T. I, p. 202.

Mendoza, près de Valparaiso, un monstrueux météore bleu et rouge avait traversé le ciel, éclairant de vastes espaces et se dirigeant de l'est à l'ouest (1).

Le Dr Vinson nous dit que le 2 novembre 1875, sans autre présage qu'un temps très sombre et une atmosphère chargée, on ressentit, vers 4 heures du soir, un violent tremblement de terre à la Réunion (2). En 1877, des secousses furent précédées dans le Loiret d'un violent orage (3). Dans le département de la Loire, après une trombe terrestre qui n'avait offert aucune manifestation électrique, un tremblement de terre se fit sentir (4).

Comme phénomènes précurseurs du tremblement de terre de Smyrne le 29 juillet 1880, le Dr Carpentier note : une chaleur torride, une sécheresse absolue : des nuages orageux, survenus de 9 *h.* à 10 *h.* du matin, couvraient une grande partie du ciel et furent accompagnés depuis le 17 de grondements de tonnerre, espèces d'orages avortés qui se dissipaient chaque soir au coucher du soleil pour reparaître le lendemain : « La température s'éleva en atteignant le 22 un maximum de 41°. La tension électrique de l'atmosphère était considérable au moment où un mugissement souterrain accompagné d'émanations sulfureuses signala le tremblement de terre (5) ».

Des perturbations atmosphériques de tout genre accompagnèrent le tremblement de terre qui détruisit presque complètement Manille les 20 et 22 juillet 1880 (6).

(1) *Volcans et tremblements de terre*, Zurcher et Margollé, p. 287.
(2) *Comptes rendus de l'Acad. des Sciences pour 1876*, T. I, p. 149.
(3) *La Nature*, 1877, I, p. 382.
(4) *La Nature*, 1878, T. II, p. 107.
(5) *Comptes rendus de l'Acad. des Sciences pour 1880*, T. II, p. 601.
(6) *La Nature*, 1880, T. II, p. 659.

En 1881, en Auvergne, pendant le tremblement de terre du 1er mars, l'atmosphère était pesante et orageuse. Le 6 septembre 1882, à Panama, la nuit était obscure, le ciel couvert de sombres nuées immobiles et pas un souffle qui vint rafraîchir l'atmosphère, la tension électrique était pénible à supporter, lorsqu'on entendit un bruit sourd suivi d'oscillations rapides.

Dans la Caroline du Sud, les secousses du 27 août 1886 furent précédées de deux météores ignés qui traversèrent le ciel. Le temps était lourd comme avant un orage ; un tourbillon furieux s'éleva subitement pendant la catastrophe et se calma aussitôt après (1).

Le 20 janvier 1891, à 4 heures du matin, de fortes secousses furent ressenties en Suisse dans les cantons de Genève, du Valais, de Vaud et de Fribourg, à la suite d'une tempête accompagnée de nombreux éclairs (2).

Le cyclone du 19 août 1891, qui détruisit Fort de France à la Martinique, fut immédiatement suivi d'un tremblement de terre.

En outre de ces observations qui, on le voit, concordent toutes, on a remarqué souvent une baisse barométrique très prononcée et M. Laur signale ce fait qu'il croit très important pour l'étude des tremblements de terre ; ceux du 27 novembre 1884 en Espagne et en Italie auraient été annoncés de cette manière (3).

Les secousses du 30 mai 1889 qui se sont principalement fait sentir à Cherbourg et près de Paris, au Vésinet, ont été

(1) *La Nature*, 1886, T. II, p. 260.
(2) *La Nature*, 1891, T. I, p. 175.
(3) *Comptes rendus de l'Acad. des Sciences* pour 1884, T. II, p. 1007 et 1168.

précédées d'une baisse barométrique considérable et suivies de trombes de pluies torrentielles et d'orages.

Ces nombreux exemples nous permettent déjà de reconnaître que les tremblements de terre et les orages se présentent dans bien des cas avec les mêmes signes précurseurs. Citons maintenant les phénomènes magnétiques et électriques qui ont accompagné leur apparition.

V. — Phénomènes magnétiques.

Depuis longtemps déjà des perturbations magnétiques avaient été observées pendant les tremblements de terre, mais on y attachait peu d'importance et on n'étudiait même pas des déviations qui étaient cependant telles que l'aiguille semblait affolée comme pendant un violent orage. Mais après les tremblements de terre d'Espagne de 1884 et surtout après ceux de Nice et d'Italie de février 1887, l'indifférence cessa car il n'était plus possible de repousser l'idée d'une relation étroite entre les courants terrestres et les secousses séismiques.

Les perturbations magnétiques importantes notées en Italie ont été recueillies par M. Luvini (1). Il nous apprend que d'après le P. Sampieri les signaux télégraphiques se confondirent le 12 mars 1873 et un tremblement de terre eut lieu quelques minutes après.

A Castrovillari le 1er août 1879 une secousse survient et l'aiguille dévie de 8° par courant négatif. On observa le même fait à Urbino le 9 août 1879.

A San Godenzo, grande agitation magnétique de la boussole le 3 février 1880 et immédiatement après une secousse

(1) *Lumière électrique*, 1887, T. XXIV, p. 479.

ondulatoire se produit. Le 2 mars 1880, l'aiguille dévie de 10° quelques secondes avant un tremblement de terre.

Le professeur Regona observa la présence de courants telluriques très intenses pendant les tremblements de terre au moyen d'un galvanomètre et d'une barre de fer verticale enfoncée dans le sol.

Le 28 février 1887, M. Fines, directeur de l'observatoire de Perpignan, envoya à l'Académie la note suivante : « Les secousses du tremblement de terre qui vient de sévir sur nos côtes orientales de la Méditerranée, au commencement de la journée du 23 février, ont été à peine perçues par un petit nombre de personnes à Perpignan ; néanmoins les ondulations du sol ont été enregistrées à l'observatoire par le séismographe et les appareils magnétiques ont été fortement troublés..... Les trois courbes du magnétographe montrent que la balance magnétique et surtout les appareils de variations pour la composante horizontale et la déclinaison ont été mis brusquement en oscillations à 5 *h*. 47 *m*. A 6 heures du matin M. Arabeyré a vu les barreaux des instruments magnétiques à lecture directe sauter verticalement sans se déplacer horizontalement » (1).

M. Mascart fait à ce sujet les remarques suivantes : « L'agitation des instruments magnétiques pendant le tremblement de terre du 23 février mérite une attention particulière parce qu'elle a mis en évidence un fait important. M. Moureaux, qui dirige ce service avec tant d'habileté à l'observatoire du Parc St-Maur, m'a remis également la note suivante : Le tremblement de terre du 23 février s'est manifesté par une brusque agitation des appareils de variations. »

(1) *Comptes rendus de l'Acad. des Sciences* pour 1887, T. I. p. 606.

« Les courbes relevées à l'enregistreur magnétique portent une trace très nette du phénomène qui s'est produit à 5 *h.* 45 *m.* du matin. Le déclinomètre, le bifilaire et la balance ont été affectés au même degré. L'oscillation paraît avoir duré plusieurs minutes; son amplitude totale au début a été environ de 7° ».

M. Mascart ne croit pas que cet effet observé soit un mouvement propagé par le sol mais, au contraire, il conclut ainsi : « Les appareils magnétiques auraient donc enregistré, non pas les mouvements du sol mais plutôt le passage de courants électriques produits dans le sol à une certaine période du tremblement de terre » (1).

M. Descroix, directeur de l'observatoire de Montsouris, fait remarquer que l'état de trouble des boussoles présentait, depuis le 19 février, un caractère particulier que ne pouvaient justifier les circonstances atmosphériques. Il pense, d'après l'aspect des courbes, qu'il serait instructif de pouvoir comparer entre elles les perturbations magnétiques de divers lieux et de les utiliser au point de vue des pronostics séismiques (2).

Un fait analogue s'est encore produit en 1889 : les courbes des enregistreurs du Parc St-Maur portaient, pour le 25 octobre à 11 *h.* 35 *m.* du soir, l'indication de troubles particuliers sans que le barreau de cuivre attaché à une suspension bifilaire ait éprouvé la moindre déviation. Or, les journaux signalaient un tremblement de terre dans le détroit des Dardanelles, à Gallipoli, et qui paraît s'être produit le 26, à 2 heures du matin, c'est-à-dire au moment des perturbations constatées à l'observatoire du Parc Saint-Maur (1).

(1) *Comptes rendus de l'Acad. des Sciences* pour 1887, T. I, p. 608.
(2) *Comptes rendus de l'Acad. des Sciences* pour 1887, T. I, p. 612.

Un tremblement de terre détruisit presque entièrement le village de Gouraïa, près de Cherchell, en Algérie, le 15 janvier 1891, à 4 *h.* 15 *m.* du matin. A la même heure, le magnétographe de l'Observatoire du parc Saint-Maur enregistra les secousses séismiques et la courbe relevée portait le tracé du trouble particulier de l'aiguille aimantée constaté déjà lors des tremblements de terre de Nice, de Werny, Asie centrale, et de Gallipoli. Le bifilaire et la balance ne semblaient pas avoir participé au mouvement du barreau de déclinaison et le bifilaire à barreau de cuivre était resté comme toujours absolument calme (2).

Ces déviations qui précèdent presque toujours le tremblement de terre indiquent donc un état particulier du sol au point de vue électrique avant que la secousse ne se fasse sentir. Dans certains cas, la perturbation magnétique qui se produit au même instant et à une certaine distance du foyer d'ébranlement semblerait résulter d'une induction provoquée par le tremblement de terre lui-même. Nous y reviendrons plus loin.

VI. — Phénomènes électriques

Quant aux effets électriques on les devine déjà d'après ces agitations qui décèlent évidemment la présence d'un flux d'électricité produit ou producteur et nous les voyons se manifester, comme ailleurs, de mille manières différentes. Aux exemples qui se trouvent compris parmi les phéno-

(1) *Comptes rendus de l'Acad. des Sciences* pour 1889, T. II (Séance du 28 octobre 1889).
(2) *Comptes rendus de l'Acad. des Sciences* pour 1891, T. I (Séance du 26 janvier).

mènes atmosphériques, nous ajouterons les suivants : « On peut citer, dit M. Heim, des émissions de gaz, de fumées ou d'odeurs singulières ou encore des sources d'eau et de boues qui jaillissent des fissures du sol. Il n'est pas rare que l'atmosphère soit fortement chargée d'électricité ; on aperçoit enfin des lueurs électriques et l'aiguille aimantée est en agitation » (1).

M. l'abbé Sainsot, curé de Terminiers, dans l'Eure-et-Loir, vit les feuilles des arbres fortement agitées pendant un léger tremblement de terre et M. Virlet d'Aoust, qui relève ce fait curieux, démontre qu'il ne peut être produit que par l'électricité (2).

Le directeur du bureau télégraphique de Cannes s'aperçut après la secousse du 23 février d'un singulier phénomène : toutes les fiches des abonnés du téléphone étaient renversées, tandis que les fiches non en rapport avec le circuit étaient debout ; il en conclut à une influence électrique très importante (3).

Le 9 mai 1887, le docteur Onimus appelait l'attention de l'Académie des sciences sur une note du lieutenant-colonel Benoît, directeur de l'artillerie à Nice, au sujet d'un fait qui s'était passé dans son service pendant la matinée du 23 février, à 8 *h.* 50 *m.*, c'est-à-dire au moment de la troisième secousse. Le gardien de batterie Muller, du fort de la *Tête-de-Chien*, était en communication télégraphique avec son collègue de la *Drette* pour rendre compte des effets de deux secousses de tremblement de terre subies le matin. Il manipulait debout, lorsque tout à coup il ressentit une

(1) *La Nature*, 1880, T. I, p. 394.
(2) *Lumière électrique*, 1886, T. XXI, p. 506.
(3) *Comptes rendus de l'Acad. des Sciences* pour 1887, T. I (Séance du 18 avril).

violente commotion qui le projeta sur sa chaise où il resta sans pouvoir remuer pendant quelques minutes. Le bras fut engourdi et ce ne fut que vers le soir qu'il put reprendre une partie de ses occupations.

« Ce fait, dit le docteur Onimus, nous a paru très important car il est relativement rare (le hasard n'amenant pas facilement une personne en contact avec des fils télégraphiques enfoncés dans le sol au moment précis d'un tremblement de terre) ; aussi nous avons cherché non seulement à le contrôler, mais encore à en préciser les détails, » et il recherche d'abord quel rôle l'imagination a pu jouer dans ces phénomènes ; mais, après avoir fait pour ainsi dire l'examen psychologique du soldat Muller, il fut convaincu de la précision des faits rapportés.

De plus, cette violente commotion ne peut être le résultat du choc imprimé par le tremblement de terre mais bien celui d'une décharge électrique car : « En revenant à lui, continue le Dr Onimus, pendant toute la journée, Muller semble être ivre, ses mouvements sont difficiles et pénibles et le bras droit surtout est comme paralysé et atteint de douleurs vagues. Le sommeil a été bon dès la première nuit, avec cette seule différence que pendant plusieurs jours, dès qu'il se réveillait, il croyait sentir un tremblement de terre. Actuellement, plus de deux mois depuis cette secousse, il éprouve à chaque instant, selon son expression, *des trémulations* dans le corps mais surtout dans le bras droit. Tout exercice un peu prolongé du bras ou de la main, ne serait-ce que l'action d'écrire, amène rapidement comme une pesanteur et le bras lui fait mal. Il indique des points douloureux le long du nerf médian. Depuis son accident il souffre presque constamment de la tête et ce qui nous a le plus frappé c'est une

légère chute de la paupière gauche, qui très souvent présente en même temps un spasme très prononcé. »

« Nous ferons observer combien l'entrecroisement est nettement indiqué dans ce cas, car c'est le bras droit qui a reçu la commotion, et c'est le bras droit et le côté gauche de la face qui sont surtout atteints. Nous pouvons donc affirmer que c'est bien une forte commotion électrique que le gardien Muller a reçue au moment précis du tremblement de terre. Au point de vue médical, cette observation peut avoir quelque intérêt, mais elle nous paraît d'une importance exceptionnelle pour indiquer que les tremblements de terre sont accompagnés de forts courants électriques. D'autres phénomènes semblaient le démontrer, mais aucun ne le prouve aussi nettement et aussi sûrement que celui-ci, et c'est pour cela que nous avons tenu à lui donner une grande certitude » (1).

Gaston Planté rappelle aussi que, d'après Lancaster, plusieurs personnes ont ressenti des commotions électriques pendant des tremblements de terre en Belgique (2).

Ne nous étonnons pas de ne trouver à ce sujet que peu de détails, car dans ces terribles bouleversements, il est souvent bien difficile de déterminer de quelle façon les nombreuses victimes ont été frappées. C'est ainsi que, pendant les éruptions volcaniques, la foudre frappe ici et là, et ses effets sont alors confondus avec les désastres causés par l'éruption même.

Les animaux dont le système nerveux est extrêmement développé sont plus sensibles à ces influences électriques et les subissent avant que les secousses ne nous révèlent le

(1) *Comptes rendus de l'Acad. des Sciences pour 1887*, T. I, p. 1243.
(2) *Lumière électrique, 1888*, T. XXVII, p. 355.

danger. Chez eux, l'instinct de la conservation n'est amoindri par aucune pensée ni préoccupation étrangère, ils donnent donc toujours des signes d'agitation ou d'inquiétude comme à l'approche d'un orage. Ces indices précurseurs sont bien connus des Péruviens et des Japonais qui, à leur constatation, s'empressent de se mettre à l'abri du fléau autant que cela est en leur pouvoir.

M. de Lesseps, qui a été témoin de ce phénomène à Panama, en 1882, nous dit que d'abord la tension électrique était très dense, puis il ajoute : « Dans la journée qui précéda la secousse, les perroquets, ici très nombreux et toujours très loquaces, devinrent muets, anxieux et tristes ; dès la nuit, les chiens poussaient de longs hurlements. Dans les boxes, les chevaux s'agitaient avec inquiétude » (1).

Avant la secousse du 25 juin 1870, à Alexandrie d'Eypte, les chevaux poussaient des hennissements d'épouvante, les chiens aboyaient avec fureur ; en outre des multitudes de poissons morts flottaient à la surface des rivières comme s'ils avaient été foudroyés (2).

De même en Auvergne, le tremblement de terre du 1er mars 1881 fut précédé d'impressions de malaise ressenties par les hommes et surtout par les animaux ; ceux-ci s'agitaient sous l'empire d'un trouble nerveux particulier, « les chevaux piétinaient avec inquiétude, les chiens faisaient entendre des aboiements sinistres » (3).

Le professeur Milne a constaté le même fait maintes et maintes fois (4), et on l'a observé encore à Nice et à Diano-Marina.

(1) Recherches sur les Tremblements de Terre. J. Girard.
(2) *Comptes rendus de l'Acad. des Sciences pour 1882*, T. II, p. 217.
(3) *La Nature, 1881*, T. I, p. 238.
(4) *Cosmos, 1887*. p. 197.

VII. — Théories électriques des tremblements de terre

L'idée d'attribuer une cause électrique aux tremblements de terre n'est pas nouvelle et, depuis plus d'un siècle, elle a été émise à différentes époques par des chimistes, des physiciens, des météorologistes. Mais on devine que chacun n'est pas en cela influencé par l'opinion souvent ignorée de ses prédécesseurs ; c'est plutôt par similitude de pensées que les théoriciens, mécontents des explications incomplètes données jusque-là, se sont tournés vers l'électricité pour lui demander la réponse à certaines questions restées obscures.

Nous avons vu Priestley (1) amené par ses déductions à considérer les tremblements de terre comme engendrés par l'électricité ; Bertholon en parle aussi dans son traité de l'*Électricité des météores*, et Brisson dit, après avoir fait sa théorie des trombes : « Les tremblements de terre sont aussi des phénomènes électriques, on a eu des preuves qu'ils s'étendaient à des distances immenses au même instant. Le tremblement de terre de Lisbonne s'est fait sentir le même jour à Lima et sur mer sur toute la ligne de Lisbonne au Pérou. Il n'y a que l'électricité qui puisse produire un pareil phénomène » (2).

Les Japonais, qui, plus que tout autre peuple, ont été mis à même de ressentir les tremblements de terre et d'en étudier les effets, croyaient à une influence électrique. Ils avaient même imaginé une sorte de séismoscope magnétique, destiné à annoncer les prochaines secousses : l'armature d'un grand aimant horizontal soutenait, par un cordon de soie, un marteau disposé au-dessus d'un gong relié à la terre. Le sol, fortement électrisé avant le tremblement de terre, devait exercer, par l'entremise du gong, une attraction plus forte que l'aimant, l'armature se détachait, le marteau tombait sur le gong et ce coup retentissant annonçait la commotion (1).

(1) Voir p. 4.
(2) *Traité de physique*, Brisson, T. III, p. 423

M. Virlet d'Aoust est du même avis que Priestley, Bertholon et Brisson, mais, pas plus que ses devanciers, il ne formule de théorie : « Nous pensons depuis longtemps, dit-il, que la plupart des tremblements de terre sont la conséquence d'actions électriques, et bien qu'à cet égard nous n'ayons que de simples conjectures, nous les croyons suffisantes pour les regarder comme offrant beaucoup de probabilités. Cette opinion nous est venue en 1829 à la suite de deux phénomènes successifs dont nous aurions pu être doublement victime. Nous trouvant alors à Navarin couché sur le sol d'un grand hangar en pierres, nous fûmes tout à coup éveillé par un grand orage pendant lequel la foudre, pénétrant sous la pierre, vint à passer à deux pieds au dessus de nous ; puis, cet orage à peine terminé, fut immédiatement suivi d'une très violente secousse de tremblement de terre qui ébranla les murs. Cette coïncidence simultanée des deux phénomènes nous fit dès lors supposer qu'ils étaient solidaires l'un de l'autre et que les tremblements de terre pouvaient très bien avoir été engendrés comme l'orage par l'électricité » (2).

M. Naudin, directeur du Jardin botanique d'Antibes, déclara, à la suite des tremblements de terre de février 1887, que les théories proposées jusqu'ici étaient évidemment

(1) Recherches sur les Tremblements de Terre, Girard.
(2) *Bulletin de la Société géologique de France*, 1885. p. 231.

insuffisantes et que ces secousses devaient provenir de décharges électriques (1).

Enfin, Planté le croyait depuis déjà quelque temps et, en 1888, il développa ainsi ses arguments : « Ce sont, dit-il, les masses nuageuses électrisées de l'atmosphère qui, lorsqu'elles ont accumulé une grande quantité d'électricité, peuvent exercer des attractions assez puissantes sur la partie fluide du globe terrestre pour produire des dislocations de la mince croûte solide qui la recouvre. Cette puissance mécanique de l'électricité de l'atmosphère eut paru autrefois difficile à concevoir, mais on peut s'en faire une idée aujourd'hui en voyant les effets mécaniques et calorifiques considérables qu'on obtient avec l'électricité artificielle, si minime cependant vis-à-vis de celle de la nature » (2).

Pour nous, certains tremblements de terre dérivent non pas d'une sorte d'induction, comme le dit Planté, mais d'une action directe de l'électricité terrestre elle-même. Dans une note présentée à l'Académie en 1885, nous exprimions les idées qui nous occupaient à ce sujet depuis plusieurs années. Nous étions convaincu, comme nous avons essayé de le démontrer dans le premier chapitre de ce travail (3), de l'action partout puissante de l'électricité et de son influence sur toutes les perturbations naturelles.

En conséquence, s'il est admis que les réactions chimiques, évaporatrices, chocs, frottements, etc., c'est-à-dire toute force dégage de l'électricité ; celle-ci à son tour est une force qui produit des effets, car si elle est cause, elle engendre évidemment des effets et si elle est effet, elle en

(1) *Comptes rendus de l'Acad. des Sciences* pour 1887, T. I (Séance du 21 mars).

(2) *Lumière électrique*, 1888, T. XXVII, p. 355.

(3) Voir p. 3.

produit encore de nouveaux. Si, par suite, il est admis que toutes les perturbations naturelles ont pour cause principale ou secondaire l'électricité, on ne peut nier l'étroite relation qui existe entre elle et les tremblements de terre. Il n'est pas possible de faire une exception à la loi générale et d'établir que les tremblements de terre seuls n'ont jamais de causes électriques ; que les tremblements de terre s'ils ont une autre cause, est la seule perturbation qui ne développe pas d'électricité, ou bien que si elle en produit, cette électricité est sans effet.

Pour ne pas en arriver à cette déduction invraisemblable, il faut reconnaître ici la présence de l'électricité, et quand bien même aucun fait ne viendrait corroborer cette hypothèse, quand même l'action électrique n'expliquerait aucun des faits demeurés étranges ou viendrait même à l'encontre des observations, le raisonnement devrait faire accepter cette idée ; mais bien au contraire on a vu de combien de phénomènes magnétiques et électriques les tremblements de terre sont accompagnés et nous aurons encore à citer de nombreuses preuves à l'appui de cette théorie.

Nous ne prétendons pas généraliser notre affirmation et détruire les opinions précédentes : celles de Humbolt, de Daubrée, de Poulett-Scrope, de Perrey, de Fuchs, de Guillemin... ; toutes sont possibles, toutes doivent être vraies. Evidemment, dans certains cas, les tremblements de terre sont les signes précurseurs ou encore les dérivatifs d'une éruption volcanique, tantôt ils peuvent être le résultat de glissements ou d'effondrements, d'une infiltration lente ou rapide des eaux de la mer, ou dépendre encore du désagrégement de la matière plutonienne ; ils sont tout cela, et ces théories appuyées sur des faits observés ont raison chacune suivant les cas. Mais sans nier l'exactitude de ces systèmes,

ils laissent encore dans l'ombre bien des faits bizarres et importants et il faut chercher dans un autre principe l'explication de certaines perturbations séismiques et des phénomènes qui les accompagnent.

D'après les observations précédentes des météorologistes et des physiciens sur l'existence des courants telluriques qui peuvent devenir à un moment déterminé d'une intensité très grande, étant donné les phénomènes atmosphériques et électriques des tremblements de terre; si l'on se rappelle, d'un autre côté, les théories qui font venir de la terre l'électricité atmosphérique, nous pouvons considérer notre globe, avec sa chaleur interne, ses réactions chimiques sans nombre et d'une force incalculable, comme continuellement parcouru par des courants électriques puissants dirigés de l'est à l'ouest par suite de la rotation de la terre en face du soleil dont l'influence régulatrice se fait évidemment sentir. Cette électricité se répand dans l'atmosphère plus ou moins rapidement suivant la conductibilité des milieux et comme nous l'avons déjà dit, elle traverse tous les corps, mais là son effet est nul pour être ici d'une violence sans limites.

Tout en suivant une direction généralement parallèle à l'équateur magnétique, l'électricité terrestre s'accumule vers les points mauvais conducteurs; faible dans telle partie de terrain, la tension peut s'élever dans telle autre par suite de la résistance que le courant y rencontre, et devenir extrême sous l'influence de causes diverses. Si l'atmosphère est sèche, chaude, peu riche en vapeur d'eau, ou chargée elle-même de fluide et que dans cet état elle ne puisse soutirer à la terre l'excès électrique des terrains isolants; si d'un autre côté, des couches crayeuses, des terres vitrescibles, des matières siliceuses, etc... se trouvent à proximité

de terrains riches en métaux, en pyroxène... il y a accumulation d'électricité, résistance, interruption dans le courant et il se produit une détente, une décharge, une étincelle comme lorsqu'un orage éclate dans l'atmosphère.

Si l'on songe que cette décharge peut avoir lieu sur une superficie de plusieurs lieues carrées, à travers des couches superposées et comprenant entre elles des cavités, des crevasses, on peut se rendre compte des terribles secousses ondulatoires ou déchirantes, des effondrements ou soulèvements, des chocs ou des oscillations qui viennent bouleverser la croûte terrestre.

L'orage souterrain, suivant son degré de tension, peut atteindre une force inouïe ou, comme son analogue l'orage atmosphérique, être faible et ne donner lieu qu'à de légères trépidations suivant les couches et les terrains à travers lesquels se transmet la commotion électrique. Comme lui aussi, les tremblements de terre dus à une cause électrique peuvent être suivis du choc en retour et faire sentir leurs effets complémentaires à des centaines de lieues de distance ainsi que cela a été observé dans plusieurs cas

Résumons maintenant les faits qui, non seulement, viennent appuyer cette hypothèse, mais dont quelques-uns ne peuvent encore s'expliquer que par elle.

A. — En plus des déviations et des affolements de l'aiguille aimantée pendant les tremblements de terre, on a remarqué des bruits microphoniques et téléphoniques comme MM. de Lalagade, Thury et Colladon en ont entendu pendant les orages (1); ne peut-on voir dans ces déviations de l'aiguille et ces claquements de la membrane téléphonique, des effets d'inductions semblables à ceux que

(1) Voir p. 186.

produisent les décharges électriques d'un orage éloigné?

B. — Les tremblements de terre électriques doivent forcément produire une détente brusque du potentiel terrestre et amener par suite des orages et autres perturbations de l'atmosphère. En d'autres cas, par leur nombre et leur violence, ils dissipent les orages et pour ainsi dire la tempête séismique remplace la tempête atmosphérique : Ainsi à Lima, où les tremblements de terre sont continuels, les habitants ne connaissent pas le bruit du tonnerre (1). De même parmi les observations multiples de M. d'Abbadie on trouve le fait suivant : A Gondar, en Ethiopie, le 12 février 1845, on ressentit à midi, à l'heure habituelle des orages, trois secousses de tremblement de terre; or l'Afrique en est exempte, sauf les côtes de la Méditerranée. M. d'Abbadie ajoute : « Il est remarquable que dans ce mois de février, il n'y eut pas un seul orage (2). » Or cependant, en Éthiopie on compte une moyenne annuelle de 212 jours orageux et 8 à 10 orages dans le mois de février.

C. — Après les secousses séismiques de l'Andalousie, de la Calabre, de la Perse... et surtout après celles qui présentent un caractère violent, on a pu remarquer une odeur sulfureuse d'ozone comme celle que la foudre laisse sur son passage. Or on sait que l'ozone s'obtient lorsque des phénomènes électriques réagissent sur l'oxygène de l'air, par l'électrisation de l'oxygène dégagé dans les actions chimiques suivant Scoutetten ou lorsque l'oxygène est traversé par des étincelles électriques (3).

D. — Les lignes de même intensité magnétique passant par l'Espagne, l'Italie, la Grèce, la Perse, le Pérou, la

(1) *Traité d'Electricité et de Magnétisme*, Becquerel, T. VI p. 711.
(2) *Sur le tonnerre en Ethiopie. Mémoires des savants étrangers*, T. XVI, p. 88.
(3) *Chimie*, Girardin, T. IV, p. 188.

Californie et le Japon coïncident avec la principale direction des tremblements de terre observés ainsi qu'avec les lignes isothermes. Cette proposition que nous avions émise en 1885 et en 1887 s'est trouvée postérieurement affirmée par les observations suivantes :

Au sujet d'une note présentée par le Dr Chistoni sur les valeurs absolues de l'intensité du magnétisme terrestre déterminées sur divers points de l'Italie, M. Tacchini ajoute ces considérations : « En présence des effets des derniers tremblements de terre du nord de l'Italie on est surpris de voir que les désastres les plus importants ont eu lieu justement sur la rivière Ligure du Couchant, c'est-à-dire dans l'aire où l'accumulation de l'intensité magnétique est la plus grande d'après M. Chistoni. En outre, nous nous rappelons parfaitement que les forts tremblements de terre ressentis dans les environs de Bellune se rapportent précisément à l'un des autres centres où existe une accumulation d'intensité magnétique; nous savons aussi que de fréquentes secousses se produisent dans la région du val Pellice, ce qui nous amène à croire que pour déterminer les zones dangereuses où les tremblements de terre sont le plus à redouter, il faudrait construire avec soin une carte magnétique. Cette carte pourrait alors servir de guide pour fixer les points d'observations systématiques sur les tremblements de terre. Pour satisfaire ma curiosité, j'ai voulu comparer la carte du terrain où avait été ressenti le tremblement de terre du 31 août à Charlestown avec les courbes magnétiques des Etats-Unis et j'ai remarqué que les courbes isoséismiques présentent une relation manifeste avec les zones étroites des anomalies majeures dans les lignes isogoniques du magnétisme. Il semble donc très probable qu'il existe une

relation entre les aires séismiques et les aires magnétiques du genre de celles décrites par le professeur Chistoni (1). »

E. — Il semble que la composition géologique des terrains ordinairement agités par les secousses séismiques vient servir encore d'affirmation à notre hypothèse.

En effet, les Cordillères ne forment-elles pas un gigantesque excitateur métallique entre les couches mauvaises conductrices des côtes et celles-ci sont agitées de continuelles secousses, tandis que l'intérieur du continent américain ne subit au contraire aucune commotion par suite de l'accumulation du fluide vers les points voisins des Andes?

Lima, on le sait, est bâti sur un terrain sablonneux qui offre de la résistance au passage de l'électricité.

Au Dacotah, dans les Etats-Unis, le sol s'ouvrit, en 1878, sur une distance de 300 *m.* et la crevasse mit à découvert une mine de charbon dont la conductibilité avait reporté vers les terrains isolants l'effort de la décharge.

Le 12 avril 1878, un tremblement de terre violent détruisit au Vénézuela la ville de Cua qui était située sur un monticule formé de couches d'argile et de pierres de chaux et entouré de gneiss, de micaschiste, de chlorite et de pyrites de fer (2).

Le tremblement de terre du 8 mars 1883 à Saint-Denis-de-Gastines dans la Mayenne, fut rapide : trois secousses se produisirent en quelques secondes et elles furent assez fortes pour faire croire que le sol allait s'entr'ouvrir : « Le pays, dit M. Faucon, est essentiellement granitique et les

(1) *Academia Reale dei Lincei, Roma*, 1887 et *Rev. int. de l'élect.* 1887. T. II. p. 106.
(2) *La Nature*, 1878, T. II, p. 46.

terrains de sédiment qui recouvrent le granit ont peu d'épaisseur » (1).

C'est à travers le village de Guevijar que s'est ouverte la plus grande crevasse des tremblements de terre d'Espagne en 1884 ; or, sous ce village, assis au pied des monts métalliques Cogollos, se trouvent des roches calcaires en grande quantité.

Aux environs de Diano-Marina, la ville la plus éprouvée dans les événements de février 1887, affluent des roches cristallines séparées par des terrains crétacés et éocènes.

M. Domeyko, directeur des mines du Chili, pose comme principe que les localités dont le sol est meuble sont plus ravagées que s'il est granitique et il cite des exemples souvent répétés de villes qui furent détruites des deux côtés de la Cordillère, alors que des villes intermédiaires, sur le roc, étaient respectées (2).

On voit que toutes ces particularités ne s'expliquent que par l'action des décharges électriques dont l'effet est violent aux points qui offrent une résistance au passage du courant.

F. — Dans de nombreux cas, les tremblements de terre ne se sont fait sentir qu'à la surface du sol et c'est à la surface que la tension électrique doit atteindre son maximum et que l'effort de déchirement doit être le plus violent. Ce fait a été notamment observé en Saxe, au Chili en 1882, à Cuba, en 1852, en France en 1883, en 1885, etc.

M. de la Torre, ingénieur, se trouvant enfermé dans une mine de cuivre avec ses ouvriers, put en sortir sain et sauf alors que toute la ville de Santiago était en ruines au-dessus de lui (3).

(1) *Comptes rendus de l'Acad. des Sciences* pour 1888, T. I, p. 869.
(2) *Comptes rendus de l'Acad. des Sciences* pour 1885, T. I (Séance du 19 janvier.)
(3) *Volcans et Tremblements de terre*, Zurcher et Margollé, p. 276.

M. Domeyko vit, en sortant d'une mine, son habitation renversée et il n'avait ressenti aucune secousse.

En août 1879 les ouvriers des mines de Virginia-City virent avec étonnement en sortant de leur travail qu'un tremblement de terre avait bouleversé la ville (1).

Enfin dans le nord de la France, à deux reprises différentes, en 1883 et en 1885, de fortes oscillations furent constatées à Dorignies et les ouvriers qui travaillaient dans les puits de houille ne s'en aperçurent pas.

M. Albert Heim reconnaît aussi d'une manière générale que les tremblements de terre sont plus intenses dans les couches superficielles.

Toutes ces remarques concordent avec ce que nous avons dit au sujet des terrains, car dans les mines de cuivre du Chili, de la Suède, dans les mines d'argent de Mariesbourg, etc.., ces terrains conducteurs n'avaient pu faire ressentir les effets de l'électricité dont la violence n'apparaissait que dans les couches isolantes.

C'est ainsi qu'à Dorignies, les terrains carbonifères furent indemnes de toute secousse ; la couche crayeuse de 200 *m.* qui recouvre le bassin houiller avait été seule atteinte.

Si l'on joint à toutes ces preuves les remarques que nous avons faites précédemment sur les phénomènes magnétiques, électriques et les perturbations de l'atmosphère qui accompagnent les tremblements de terre ainsi que les effets électriques produits sur les hommes et les animaux, on peut conclure, croyons-nous, à une influence électrique dans les tremblements de terre ; l'électricité terrestre se trouve localisée ou influencée par certaines conditions de

(1) *La Nature, 1879*, T. II, p. 290.

l'atmosphère et acquiert plus ou moins de développement suivant la résistance que les terrains lui opposent.

Au reste, les études séismologiques prennent chaque jour plus d'extension ; en 1888 un cours spécial a été fondé à la Sorbonne et déjà en 1880 M. le professeur Heim de Zurich avait formé une commission d'études qui demandait dans un questionnaire les renseignements détaillés qu'elle croit utiles (1). Par exemple :

1° Le jour et l'heure *exacte* du tremblement de terre.
2° La localité et le lieu où se tenait l'observateur.
3° La nature du sol.
4° Le nombre des secousses
5° Leur description aussi exacte que possible.
6° La direction de propagation.
7° La nature du bruit, son intensité.

A ces questions nombreuses nous souhaitons voir ajouter :

1° Les déviations de l'aiguille aimantée.
2° L'état électrique du sol ; ce qui pourrait être vérifié à l'aide de fils profondément enfouis.
3° La constitution du sol au point de vue de la conductibilité électrique, au foyer d'ébranlement.
4° L'état de l'atmosphère avant, pendant et après les tremblements de terre.
5° Les odeurs et vapeurs qui peuvent se dégager des crevasses.
6° Un examen médical des victimes afin de se rendre compte des lésions et des diverses causes qui les ont produites.

Les observations si détaillées qui se font maintenant avec tant de soin répondront sans doute bientôt à ces nombreuses interrogations.

(1) *La Nature*, 1880, T. II, p. 84.

CHAPITRE VII

AURORES POLAIRES

Après avoir étudié toutes les perturbations qui agitent notre globe et son atmosphère, portons nos regards vers les cieux des régions arctiques et nous y verrons scintiller des lumières éclatantes. De toutes les grandes manifestations électriques, l'aurore boréale est la seule que le spectateur puisse admirer sans craindre qu'un danger en accompagne la durée et ne vienne le troubler dans sa contemplation.

C'est, pour ainsi dire, comme la dernière expression de l'électricité naturelle qui, s'échappant des pôles magnétiques de la terre, va fuser vers les espaces éthérés en longs rubans de feu colorés des teintes les plus vives.

Ce magnifique spectacle nous est rarement donné dans toute sa splendeur ; c'est vers les confins du monde habité, dans le calme des nuits claires et glacées du pôle, que ce feu mystérieux brille dans tout son éclat, et nous n'en avons le plus souvent qu'un reflet pâle et embrumé. Ce sera donc aux voyageurs des mers glaciales, aux explorateurs des

pays arctiques que nous demanderons des descriptions ; c'est à eux qu'il faut emprunter des renseignements pour pouvoir peindre ces aigrettes gigantesques avec tous leurs feux et ces draperies lumineuses aux couleurs si diverses.

I. — Description et caractères des aurores polaires

I. Dans nos contrées, à de rares intervalles, à des époques qui sont marquées dans les fastes de la météorologie, on voit, trois ou quatre heures après le coucher du soleil, une sorte de brouillard jaunâtre qui s'étend en bandes longues et étroites un peu au-dessus de l'horizon ; puis la blanche lumière aurorale apparaît en un arc qui s'élève au-dessus d'un segment obscur et se dessine bientôt nettement, ayant son centre au nord magnétique. De cet arc, s'élancent des jets et des rayons dont la lumière augmente et diminue alternativement et qui passent du rouge clair au rouge sombre pour se perdre enfin dans les profondeurs du ciel. La couleur rouge est celle que l'on observe le plus fréquemment dans les aurores, et lorsqu'on aperçoit ces grandes traînées rouges qui paraissent encore indécises à travers la brume qui les enveloppe, cela peut donner l'illusion d'un incendie éloigné.

Gassendi décrit un de ces phénomènes qu'il observa à Aix en Provence, le 21 septembre 1621 : C'était une nuée lumineuse qui occupait 60° de l'horizon, de l'est à l'ouest ; elle avait la forme d'un arc de 40° qui lançait, dit-il, « des pyramides et des colonnes blanches et rouges » (1).

L'aurore boréale peut aussi représenter des arcs multiples ou plus rarement prendre l'aspect d'un dôme presque com-

(1) *Abrégé*, Gassendi, T. V, p. 245.

plet, et l'on vit en Angleterre, le 6 mars 1716, « un pavillon de rayons étendu dans le ciel de tous les côtés, du nord au midi, et des colonnes d'un feu rouge très vif qui dardaient avec rapidité » (1). Cette vision ne dura que deux minutes.

Le 24 octobre 1870, pendant le siège de Paris, une aurore boréale se montra vers huit heures du soir ; on crut aussitôt à un vaste incendie ; elle fut spécialement observée par M. A. Guillemin. C'était d'abord une lueur rougeâtre qui s'éleva sous la forme d'un arc immense, s'étendit de l'est à l'ouest, puis augmenta d'amplitude et finit par dépasser le zénith ; des rayons rouges s'échappaient de l'arc et du côté du nord on voyait le segment obscur habituel en dessous de la zone lumineuse : « Sauf les rayons, dit M. Guillemin, qui çà et là, à intervalles irréguliers, sillonnaient le fond de l'arc, et dont la teinte était d'un blanc rougeâtre ou légèrement orangé, aucune des parties de l'arc n'affectait de couleurs différentes du rouge. Mais cette teinte variait assez souvent de ton : elle était tantôt rosée, tantôt d'un rouge sanglant très éclatant et très lumineux, tantôt d'un rouge sombre ; en aucun cas toutefois elle ne cessait d'être transparente et de laisser voir sur son fond les étoiles, même celles de troisième et de quatrième grandeur... Au moment où l'arc atteignait le zénith, toute sa périphérie extérieure était bordée d'une teinte blanchâtre d'un ton laiteux, analogue d'aspect à la voie lactée, mais beaucoup plus régulière et plus uniforme. Le phénomène, tout en s'affaiblissant, était visible encore après onze heures du soir, mais c'est entre huit heures et huit heures et demie qu'il parut avoir atteint son maximum d'éclat » (2).

(1) *Mém. Litt. de la Grande-Bretagne*, T. XII, p. 320.
(2) *Le Monde physique*, Guillemin. T. III, p. 108.

Des lueurs aurorales blanches et rouges furent aussi aperçues à Brest le 7 juillet 1872 (1).

Fig. 83

(1) *Comptes Rendus de l'Acad. des Sciences* pour 1872, T. II, p. 549.

L'aurore du 2 octobre 1882, observée par M. Renou au parc Saint-Maur, était peu colorée et les rayons étaient blanchâtres (1). D'après M. Delamare, celle du 17 novembre suivant, à Cherbourg, affectait la forme d'un champignon vu d'en dessous et dont la tige est coupée (2).

Toutes les aurores boréales présentent donc, à peu de chose près, l'un ou l'autre de tous ces caractères.

Dans les régions polaires, elles sont loin d'avoir ces teintes uniformes. Comme dit Martins, aucun peintre n'a sur sa palette de couleurs assez vives, assez diverses pour retracer toutes les teintes de ce magnifique phénomène ; aucun poète, aucun narrateur ne peut en raconter toutes les splendides beautés. Les aigrettes se distinguent nettement ; elles se colorent de violet, de vert et de jaune. Ce sont tantôt des bandes régulières enroulées largement les unes sur les autres, sans mêler leurs couleurs (fig. 83) ; tantôt de grandes ondulations agitées comme par un vent léger qui semble en ranimer les feux sous son souffle ; ou bien des fumées rougeâtres, indécises, qui montent en serpentant vers le zénith (fig. 84). C'est encore un voile d'un rouge éclatant, à bouts jaunes, qui se noue régulièrement sur le bleu foncé du ciel étoilé, et tous ces feux sont animés de mouvements flamboyants, ondulatoires ou même gyratoires.

Un dessin d'aurore boréale communiqué à *la Nature* par le capitaine Hall représente des raies verticales brillantes qui tombent en plis ondoyants en face du spectateur, comme une sorte de rideau de feu, et dont la partie supé-

(1) *Comptes Rendus de l'Acad. des Sciences* pour 1882, T. II, p. 651.

(2) *Comptes Rendus de l'Acad. des Sciences* pour 1882, T. II, p. 1013.

rieure est recouverte par des draperies lumineuses qui vont en tremblant se perdre dans les nuées (1).

On peut enfin admirer une aurore embrasant le ciel en

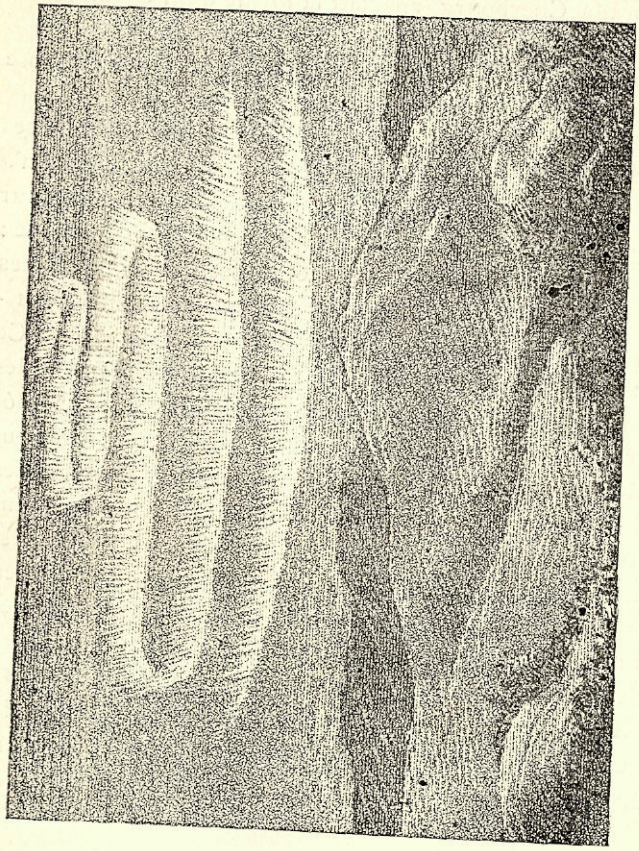

Fig. 84

entier : « Le 18 octobre 1868, dit M. Lemström, après une lutte violente, le navire s'approchait des côtes de

(3) *La Nature*, 1880, T. II, p. 97.

Norwège par un vent qui devint contraire au dernier moment. A l'ouest de l'horizon, nous remarquâmes alors deux couches que séparait nettement une bande bleue de ciel croisée par une bande striée d'un jaune pâle. C'était le faible commencement d'une aurore boréale dont la splendeur devait bientôt surpasser tous les phénomène du même genre que nous eussions observé jusqu'alors pendant le voyage. Les bords de la couche supérieure des nuages s'éclairèrent peu à peu et bientôt nous en vîmes sortir des

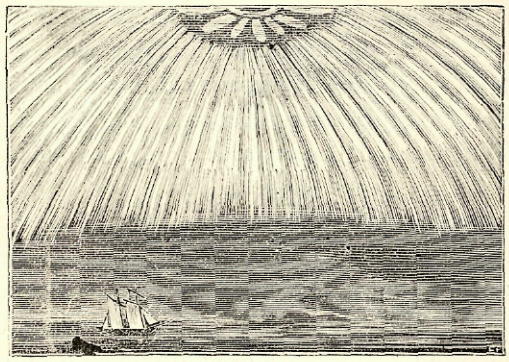

Fig. 85

flammes isolées qui parfois montaient jusqu'au zénith. Subitement, le phénomène embrassa tout l'horizon. Partout des flammes, partout des jets d'éclatante lumière, jaunes dans le bas, verts au milieu et rouge-violet à l'extrémité supérieure. En un instant, tous les rayons se réunirent en une couronne régulière et éblouissante qui se dessina sur le ciel, au sud du zénith (fig. 85). Quand le phénomène fut arrivé à son maximum d'intensité, il nous fit l'effet de la voûte immense d'un temple au milieu de laquelle brillerait un lustre splendide. L'apparition ne dura que quelques mi-

nutes, mais en s'effaçant elle laissa encore après elle une zone lumineuse entre les couches de nuages. De la couche supérieure continuèrent à s'élancer, à de courts intervalles, des rayons isolés qui montaient jusqu'au zénith et y formaient les fragments d'une couronne. Les bords des couches des nuages restèrent lumineux, alors même que les rayons eurent disparu » (1).

En plus de ces espèces de palpitations propres aux lueurs électriques, et dont les feux de l'aurore boréale sont animés, l'ensemble du phénomène s'étend sur l'horizon, monte, se déplace dans un sens ou dans l'autre, sans qu'il soit possible de rien déterminer, malgré les efforts des savants pour établir des règles sur ces mouvements.

II. Un léger bruissement accompagne, d'après certains auteurs, l'apparition des aurores boréales, mais d'autres l'ont nié.

Bergmann (2) prétend que les aurores font entendre un bruit particulier semblable au battement d'ailes des oiseaux ; les habitants du Shetland et les pêcheurs groënlandais l'affirment également. Becquerel pense que les aurores peuvent se former à des altitudes plus ou moins élevées et par suite que le bruit qu'elles produisent ne s'entend pas toujours (3). Il explique ainsi la contradiction qui règne parmi les observations. Durant son séjour au Fort Raë, en 1882, le major Dawson perçut ce bruit, qui ressemble, d'après lui, à un violent coup de vent sifflant dans les agrès d'un navire (4).

M. Lemström croit d'ailleurs que ce faible bruit peut

(1) *L'Aurore boréale*, S. Lemström, p. 9. — Paris 1886.
(2) *Opuscula phys. et chim.*, Toberius Bergmann, T. V, p. 297.
(3) *Traité d'électricité et de magnétisme*, Becquerel, T. VI, p. 201.
(4) *Ciel et Terre*, 4e année, p. 135.

être couvert par des causes accidentelles, telles que le murmure du vent ou le grondement de la mer. C'est à cela qu'il attribue de ne pas l'avoir remarqué, mais il a recueilli des affirmations dignes de foi (1). Kaëmtz et le docteur Hjaltalin ont la même opinion. L'avis de Siljeström est tout autre ; il ne nie pas que ce bruit puisse exister, mais, selon lui, les relations des Lapons et des Groënlandais ne suffisent pas à le prouver, et cette croyance peut dépendre d'une illusion, car lorsqu'on regarde ces flammes s'élever, paraître et disparaître avec rapidité, on est facilement ébloui et victime d'une erreur des sens. Bravais repousse entièrement l'idée de ce bruit ; de même, Mohn le croit impossible à cause des grandes hauteurs où règnent les aurores, là où l'air raréfié ne peut transmettre le son jusqu'à la surface terrestre (2).

III. Les aurores sont en effet des phénomènes qui se produisent, d'après la plupart des observateurs, dans les hautes régions de l'atmosphère, puisque certaines d'entre elles sont visibles à la fois de différents points très éloignés l'un de l'autre.

Celle dont Gassendi fut témoin le 12 septembre 1621 en Provence fut aperçue dans l'Europe entière : en France, en Italie, et aussi en Syrie...

L'aurore de 1726 était visible au même instant depuis Varsovie, Moscou et Saint-Pétersbourg jusqu'à Rome, Naples, Cadix et Lisbonne. « En admettant, dit Becquerel, que le phénomène vu en même temps dans ces deux dernières villes se fût présenté le plus près possible de l'horizon, ce qui est le cas le plus défavorable pour avoir une mesure approchée de la région où il existe, on

(1) *L'Aurore boréale*, Lemström. p. 9. — Paris 1006.
(2) *Météorologie*, Mohn. p. 432.

obtient une valeur de 58 lieues pour la hauteur perpendiculaire du point où se coupent les deux tangentes qui forment les rayons visuels des observateurs. On doit conclure que l'aurore se montre bien au-delà des limites assignées à l'atmosphère » (1).

Mairan place l'aurore polaire à une hauteur de 260 lieues, Euler à 90 lieues, Cavendish, à 25 lieues, Airy à 24; Franklin et Parry assurent qu'elle se montre dans la région des nuages. M. Lemström est de cet avis : « A Aloulack, dit-il (64° lat. N.) près du détroit de Norton, Pease et Kelchum virent (en novembre 1865) l'aurole boréale contre la pente d'une montagne située à une distance d'environ 30 *kilom.* On voyait distinctement la cîme de la montagne au-dessus du phénomène de lumière. La température était de 34° et la lumière si forte qu'on pouvait lire même l'écriture la plus fine. Un pétillement extraordinaire se fit entendre au même instant. Les observateurs étaient des employés du télégraphe; leur récit mérite toute confiance » (2).

De plus, comme M. Lemström range dans la même catégorie, les feux Saint-Elme, les éclairs, les lueurs diffuses dites éclairs de chaleur et les aurores polaires, il assigne à ces dernières une hauteur quelquefois encore moindre et il cite des lueurs fréquentes qui se montrent, comme il vient d'en donner un exemple, soit au-dessus, soit au pied des montagnes du Spitzberg et de la Laponie ainsi que des phénomènes de lumières blanchâtres remarquées à la surface du sol pendant l'hiver de 1882 à 1883. Les aurores se produiraient donc d'après lui à toutes les hauteurs.

(1) *Traité d'Electricité et de magnétisme*, Becquerel, p. 203.
(2) *L'aurore boréale*, S. Lemström, p. 49.

Bien que Bergmann leur suppose une élévation de 195 lieues il semble avoir admis, comme M. Lemström, l'extrême opposé quand il dit que des voyageurs, en traversant les montagnes de la Norwège, furent enveloppés par les feux de l'aurore elle-même et sentirent en même temps une forte odeur sulfureuse (1).

Siljeström fait ici une objection semblable à ses précédentes au sujet du bruit : il prétend que les voyageurs qui disent s'être trouvés au milieu de l'aurore ont été trompés par une illusion d'optique, car ces lumières vives qui s'élancent de tous côtés et se réfléchissent sur la neige et la glace peuvent facilement faire croire que leur point de départ est près du sol alors qu'il en est fort éloigné (2).

Si l'on met à part les lueurs dont parle M. Lemström on peut dire cependant que la hauteur moyenne des aurores est de 20 à 25 lieues, c'est-à-dire aux confins de notre atmosphère et non en dehors.

IV. On comprend facilement par toutes les descriptions précédentes pourquoi le nom d'*aurore* a été donné à cette lumière blanchâtre qui semble annoncer le retour du soleil; quant au qualificatif de *boréale*, il ne doit pas être employé indistinctement, puisqu'il y a aussi des aurores australes, de là l'appellation plus générale et mieux appropriée d'aurore polaire pour désigner ce phénomène. Il est vrai cependant que dans notre hémisphère, il ne peut guère être question que de l'aurore boréale; le XVII^e^ siècle l'avait appelée *lumière septentrionale*, et l'on s'en est occupé plus spécialement aussi par suite des difficultés que présentent la navigation et surtout le séjour dans les régions antarctiques.

(1) *Opusc. phys. et chim.*, Bergmann, T. V, p. 297.
(2) *Voyages en Laponie.*

Suivant Mohn il est très probable que les aurores australes se manifestent en même temps que les aurores boréales et M. Decaudin-Labesse fait observer qu'en 1870 et 1872 des aurores ont été vues simultanément à la Réunion et à Paris. (1)

V. — Dans les régions polaires du Nord comme probablement dans celles du Sud, il n'est pas de nuit qui ne soit illuminée par les feux d'une aurore. Le lieutenant de vaisseau Lottin qui, dans ses explorations, séjourna à Bossekop, comptoir norwégien, dans la baie d'Alten, sur la côte de West-Finmark, put observer 143 aurores en 206 jours, de septembre 1838 à avril 1839; la nuit de 70 fois 24 heures, du 17 novembre au 25 janvier, offrit 64 aurores sans compter celles qui furent évidemment dérobées à l'observateur par un ciel trop nuageux. Par suite, tandis que nous avons vu le ciel, dans les pays tropicaux, sans cesse sillonné par des éclairs, on peut le considérer comme rayonnant toujours aux pôles de mille lueurs aurorales.

M. Lemström a dressé, pour une période de 25 ans, une statistique dont les chiffres nous renseignent sur la fréquence des aurores pendant les différents mois de l'année :

Janvier.....	76	Juillet	100
Février.....	86	Août	122
Mars.....	106	Septembre....	131
Avril.....	125	Octobre.....	110
Mai.....	83	Novembre....	74
Juin.....	79	Décembre	60

(1) *Météorologie.* — Mohn. Traduction de M. Decaudin-Labesse, p. 431.

Et les diverses saisons donnent les moyennes suivantes :

Printemps	314
Eté.....	301
Automne.....	315
Hiver.....	222

Les aurores sont donc plus nombreuses à l'automne et au printemps. Nous parlerons plus loin des variations périodiques.

II. Concordance de certains phénomènes avec les aurores polaires.

I. Les aurores polaires sont ordinairement annoncées par une extrême agitation de l'aiguille aimantée et la variation diurne de l'aiguille de déclinaison est profondément troublée par ce que l'on appelle *un orage magnétique*. Ces perturbations remarquées déjà par Halley furent observées spécialement à Upsal en 1740 par Hyorter et Celsius et, depuis cette époque, elles n'ont pas cessé d'être soigneusement étudiées. Bravais et Lottin, en 1839, dans leurs expéditions polaires, notaient à chaque instant les agitations magnétiques qui décèlent la présence visible ou invisible d'une aurore. L'aiguille indiquait aussi les fluctuations des feux de l'aurore et sa déviation était proportionnelle à leur durée, leur nombre et leur intensité.

M. Tarry a recueilli les observations de M. Sureau, à Brest, sur l'aurore du 7 juillet 1872 (1). Le galvanomètre avait dévié à 40° et s'y était maintenu pendant 5 minutes.

(1) *Comptes Rendus de l'Acad. des Sciences pour 1872*, T. II, p. 549.

Une déviation de ce genre est, d'après M. Tarry, le signe précurseur d'une aurore. Il remarque aussi leur coïncidence avec des perturbations solaires, il rapporte que le P. Secchi assista le 7 juillet, à 8 *h.* 30 *m.* du soir, à une violente explosion à la surface solaire, indépendamment des grandes taches qui s'y montraient.

L'aurore du 31 janvier 1881 fut visible en Angleterre, en Belgique, en Italie et dans presque toute l'Europe sous la forme d'un arc lumineux d'où émergeaient des rayons rouges et blancs qui se déplaçaient sans cesse; l'arc s'est effacé trois fois et a reparu trois fois en diminuant d'intensité et de durée. Les instruments de l'observatoire de Bruxelles ont été troublés pendant tout ce temps; le barreau de déclinaison était déjà fort agité depuis midi. A 6 *h.* 10 *m.*, c'est-à-dire au commencement du phénomène, il a été violemment poussé vers l'ouest, est revenu dans sa première position vers 7 *h.*, puis a de nouveau été sollicité dans le même sens avec une force presque égale, au moment où l'aurore était dans sa plus grande intensité; enfin, après un troisième mouvement, toujours vers l'ouest, à 7 *h.* 20 *m.*, causé par une recrudescence du phénomène, le barreau se dirigea vers l'est, où il stationna quelques instants, pour revenir à l'ouest : ce double mouvement correspondait à une augmentation d'éclat de la lueur blanche (1).

Les aurores boréales de novembre 1882 étaient d'une intensité remarquable et furent accompagnées de fortes perturbations magnétiques et de courants telluriques dans toutes les régions du globe : « Une tempête électrique, dit Planté, a été ressentie à l'ouest de Chicago. Le courant qui parcourait les fils télégraphiques (et qui devait résulter

(1) *La Nature, 1881,* T. I. p. 209.

sans doute d'un puissant effet d'influence de l'atmosphère fortement électrisée) était tel que dans les bureaux des télégraphes de Chicago et d'autres villes, le feu s'est déclaré dans les appareils de réception et que des parties métalliques de ces appareils ont été fondues. A Milwankee, l'intensité du courant suffisait à alimenter une lampe électrique ».

« Les aurores boréales produites en même temps ont été vues en France le long de la côte de la Manche, dans les départements du nord et dans les régions basses du bassin du Rhône. En Angleterre, à l'observatoire de Greenwich, un arc d'un grand éclat s'est manifesté, accompagné de rayons brillants qui s'en échappaient de toutes parts et s'élevaient jusqu'au zénith.

« M. Piazzi Smith a pu observer l'aurore à Edimbourg; vers minuit le phénomène atteignait sa plus grande intensité; les rayons semblaient monochromes, couleur jaune-citron et la plupart avaient la forme de jets rectilignes projetés à 15 ou 20° de hauteur. Ces phénomènes ont coïncidé avec l'apparition sur le soleil de taches nombreuses et de grande étendue » (1).

Des perturbations et des orages magnétiques ont aussi été notés à Marseille par M. Tarry, à Quiévy (Nord) par M. Van Oordt (2), par M. Renou à Paris.

M. de Lalalagade se servit de deux téléphones placés sur un circuit souterrain pour observer ces perturbations; le 17 novembre, à midi, il entendit un roulement faible, comme celui que produit une bobine Rhumkorff ou une

(1) *Phénomènes électriques de l'atmosphère,* G. Planté, p. 312.
(2) *Comptes Rendus de l'Académie des Sciences pour 1882,* T. II, p. 1072.

sonnerie, parfois le roulement était entrecoupé d'un bruit sec et il reprenait après un silence (1).

II. La concordance des aurores polaires avec le magnétisme est donc chose constatée et admise, mais elle est plus contestée en ce qui concerne les perturbations solaires. Nous voyons cependant des affirmations dignes de foi. Tacchini remarque aussi l'apparition de grandes taches solaires le 17 novembre 1882 Nous rappellerons que c'était l'avis de M. Zenger et de M. Lemstrom, qui cite à ce sujet les observations de M. Loomis, résumées par ce dernier dans le tableau suivant :

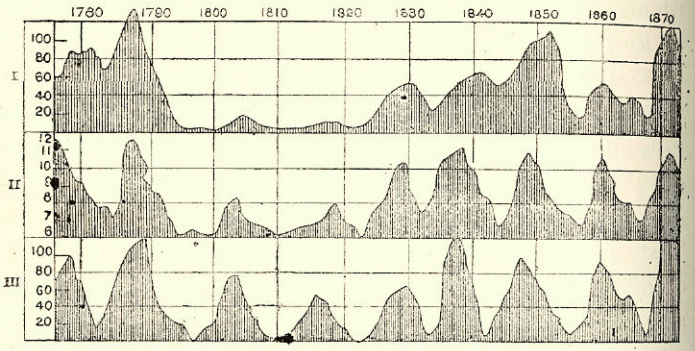

Fig. 86

On voit que les aurores polaires (I, fig. 86) coïncident depuis 1780 jusqu'en 1870 avec les variations du magnétisme terrestre (II) et l'extension relative des taches solaires (III); les unes et les autres atteignent un maximum tous les 11 ans et un autre plus accentué au bout de 60 ans, mais dont il est plus difficile de vérifier la constance.

M. Liznar, adjoint au bureau central météorologique de

(1) *Comptes Rendus de l'Acad. des Sciences pour 1882*, T. II, p. 1014.

Vienne, fit des études plus détaillées encore, d'abord sur la période de 26 jours que présentent les variations diurnes des éléments du magnétisme terrestre. MM. Broun et Hontein l'avaient démontré ; il s'est assuré de l'exactitude de leurs calculs par des observations faites aux stations polaires de Fort Raë et de Jean Mayen : « Cette période de 26 jours, dit-il, ne pouvant correspondre qu'avec la rotation solaire, on voit que cette dernière exerce, aux longitudes magnétiques élevées, sur les éléments du magnétisme terrestre, une influence qu'on aurait à peine supposée et que ces observations permettent de déduire de la durée de cette rotation » (1).

Puis M. Liznar a recherché si l'on pouvait déterminer une période semblable pour les aurores boréales ; à l'aide des observations du Fort Raë et de Bossekop, il a constaté que les phénomènes d'aurores boréales se reproduisent dans une période de 26 jours environ, comme les éléments du magnétisme terrestre (2).

Pendant les aurores boréales, les lignes télégraphiques accusent de forts courants telluriques, comme nous l'avons vu précédemment dans la citation de Planté. Ces effets ont été spécialement étudiés par MM. Blavier en France, Walker et Preece en Angleterre, Prescott en Amérique. Nous en avons parlé dans le chapitre des tremblements de terre et nous savons combien il est difficile de séparer les courants telluriques des variations du magnétisme terrestre. Nous n'insisterons donc pas davantage sur cette question encore bien obscure aujourd'hui.

(1) *Académie des Sciences de Vienne* (Séance du 3 mars 1887) et *Rev. Intern. de l'Elect.* T. IV, p. 425.

(2) *Acad. des Sciences de Vienne* (Séance du 11 octobre 1888), et *Rev. Int. 1889*, T. VIII, p. 25.

III. Les aurores polaires coïncident de plus avec les grandes perturbations de notre globe, telles que cyclones et tremblements de terre ; tous ces phénomènes s'enchaînent, on le voit, et pas un ne reste isolé. L'aurore boréale qui a été aperçue d'une grande partie des Etats-Unis le 23 avril 1882 a amené une suite de troubles électriques et atmosphériques. En divers lieux, on a éprouvé des oppressions semblables à celles que causent parfois les tremblements de terre ; du 14 au 22, des cyclones et plusieurs ouragans d'une violence extrême, ont détruit quelques villages du Mississipi (1).

Le mois de février 1887, malheureusement célèbre par ses tremblements de terre, a été aussi caractérisé par des aurores boréales extraordinairement brillantes, qui ont surtout été signalées en Ecosse ; les rayons, d'une intensité extrême, étaient projetés si loin du centre et si subitement que les paysans effrayés les prenaient pour des éclats de foudre sans tonnerre (2).

Enfin M. Lemstrom reconnaît à juste titre que s'il est démontré que les aurores, les taches solaires et les grandes perturbations terrestres subissent les mêmes variations, cette périodicité doit se faire sentir sur les récoltes. Nous arrêterons ici l'énumération de ces concordances qui, en dépit des contradictions, s'affirment toujours davantage, et nous nous occuperons des théories successivement proposées pour expliquer le phénomène des aurores polaires.

(1) *La Nature, 1882*. T. II, p. 31.
(2) Idem, *1887*. T. I, p. 275.

III. Théories des aurores polaires

Muschenbroek, Maraldi... et presque tous les savants du commencement du XVII^e^ siècle attribuaient les aurores polaires à des exhalaisons bitumineuses et nitreuses qui s'enflammaient d'elles-mêmes dans l'air et qui, sous le souffle du vent, montaient en s'agitant vers les hautes régions de l'atmosphère. D'autres, Euler par exemple, ont imaginé que les glaces et les neiges des régions polaires réfléchissaient les rayons du soleil vers la surface des couches inférieures de l'atmosphère, et ces rayons nous étaient renvoyés en produisant toutes les apparences de l'aurore (1).

Mairan croyait que l'aurore boréale était produite, ainsi que la lumière zodiacale, lorsque la matière lumineuse qui entoure le soleil s'approche assez de la terre pour en subir l'attraction ; elle arrive dans notre atmosphère et, par le mouvement plus rapide des molécules d'air situées sur l'équateur, se trouve repoussée vers les pôles, où la vitesse est moins grande (2).

Le principe du magnétisme, développé par Gilbert, devait servir aussi à formuler des théories sur les aurores et, dès 1716, Halley les supposait dues à des tourbillons magnétiques traversant la terre du sud au nord et qui deviennent lumineux par eux-mêmes sous l'influence d'exhalaisons diverses. On crut évidemment voir une concordance complète entre ces phénomènes polaires et la force qui dirige l'aiguille vers le nord : « Le tourbillon de matière magnétique, dit le P. Regnault, que l'on fait circuler depuis M. Descartes, d'un pôle de la terre à l'autre

(1) *Mém. de l'Acad. de Berlin, 1746*, T. II.
(2) *Traité de l'Aurore boréale*, Mairan, 1750, p. 12.

pour diriger les pôles de l'aiguille aimantée vers les pôles de la terre est encore du moins vraisemblable. Qu'est-ce, en effet, qui donne à l'aiguille cette direction, sinon une matière insensible qui ait la même direction ? L'aiguille ne l'a pas d'elle-même. Or, ce tourbillon sortant abondamment et avec impétuosité du pôle et des contrées voisines, n'emporterait-il pas une quantité extraordinaire d'exhalaisons sulfureuses remplies de cette matière déliée, qui les rendrait fort légères et très inflammables ? Sorties des climats du nord, elles y rendraient les phénomènes presque continuels comme ils le sont. Légères, elles s'élèveraient, comme elles s'élèvent, au-dessus des nuages et un souffle de vent les porterait, comme on les voit portées, tantôt vers le midi, tantôt vers l'orient ou vers l'occident. Abondantes, elles pourraient couvrir, comme elles firent dernièrement, une grande partie du ciel et offrir de temps en temps à nos yeux ces spectacles qui répandent la terreur parmi le peuple, au moment qu'ils réjouissent les philosophes, tranquilles spectateurs du ciel tout en feu » (1).

Après le magnétisme, dès que la théorie de l'électricité fut complétée par la connaissance du rôle important qu'elle remplit dans l'atmosphère, la plupart des savants n'hésitèrent plus à faire dériver l'aurore polaire de cette grande force, dont ce devait être là une des manifestations les plus frappantes. Cependant, tous n'étaient pas convaincus et l'on sent des réticences en lisant, par exemple, les lignes suivantes de l'abbé Haüy : « Parmi les différentes causes qui ont été assignées aux aurores boréales, on pourrait être tenté de donner la préférence à l'électricité. Mais jusqu'ici cette préférence n'est fondée sur aucune observation sérieuse et l'incertitude qui reste encore sur tout ce qui concerne le phénomène dont il s'agit sera une nouvelle preuve que ce qu'il y a de plus anciennement connu n'est pas toujours ce qui l'est le mieux » (1).

(1) *Entretiens sur la Physique*, Le P. Regnault. T. IV, p. 168. 1755.

En effet, ce n'était encore là qu'une de ces intuitions et probabilités que le siècle dernier vit naître en grand nombre et que le nôtre a transformées en quasi certitudes. Les faits, les observations détaillées se succédèrent bientôt et l'on voit les théories qui suivirent, admettant toutes le principe de l'électricité, se rapprocher peu à peu et se confondre enfin dans leur ensemble, pour ne plus différer que dans certains détails.

Eberhart, professeur à Hall et Paul Frisi à Pise, furent les premiers qui proposèrent d'expliquer l'aurore boréale par l'électricité en s'appuyant sur les faits suivants : 1° l'électricité qui passe dans le vide s'y montre avec les mêmes apparences lumineuses que celles observées dans l'aurore boréale ; 2° l'air devenant moins dense à mesure qu'on s'élève, les décharges doivent présenter les mêmes lueurs que celles des tubes à air plus ou moins raréfié.

Canton, Beccaria, Bertholon, Wilke, Priestley, Franklin, émirent des idées semblables que nous n'énumérerons pas. Pour Franklin, le fluide électrique, transporté, par les nuages qui en sont chargés, des régions équatoriales vers les pôles, descend avec les neiges et les glaces qui couvrent ces pays et, après s'y être accumulé, remonte vers les hauteurs de l'atmosphère ; lorsqu'il atteint le vide, le fluide se dirige de nouveau vers l'équateur en divergeant suivant les méridiens et forme les jets de lumière et les variétés de l'aurore : « Cela peut passer, dit Franklin lui-

(1) *Traité de Physique*, Haüy, T. II, p. 148.

même, comme une explication de l'aurore boréale » (1).

Dalton reconnaît l'influence de l'électricité, mais il fait intervenir les poussières ferrugineuses des espaces interplanétaires et dont les propriétés magnétiques devaient, selon lui, contribuer à l'apparition des lueurs polaires (2).

Plus tard, Biot reprit cette idée, mais il ne donne pas aux poussières ferrugineuses une origine cosmique, il les fait venir des volcans des îles Aléoutiennes, du Kamtchatka, etc... Ces poussières, d'une ténuité extrême, transportées en colonne vers les pôles, formeraient des sortes de conducteurs pour l'électricité et s'illumineraient sur le passage du courant. Cette théorie était justifiée par les dépôts considérables de particules de fer trouvées sur les neiges des régions polaires.

On se contenta longtemps de l'explication vague des premiers électriciens, lorsqu'ils avaient assimilé les feux de l'aurore boréale aux lueurs rougeâtres que présente le globe de verre à air raréfié où l'on fait passer des décharges électriques, et l'on trouvait suffisant de déclarer que les aurores polaires n'étaient autre chose que des décharges de l'électricité atmosphérique dans les espaces éthérés. Mais on voulut ensuite détailler et décrire scientifiquement tous les phénomènes de l'aurore, expliquer pourquoi sa présence est particulière aux régions polaires et donner des raisons sérieuses aux perturbations qui en dérivent; il fallait aussi que les théories pussent concorder avec l'origine attribuée à l'électricité atmosphérique. De la Rive surtout chercha avec ardeur une solution et réussit à présenter en 1862 une théorie qui resta longtemps la seule

(1) *Exp. et Observ. sur l'Electricité*, p. 118. Paris, 1752.
(2) *Meteorological Observations and Essays*, 1793.

adoptée, puis devint le prélude des travaux plus complets de MM. Luvini, Edlund, Lemström et Planté.

I. De la Rive suppose que l'électricité de la terre est négative et celle de l'atmosphère positive. Cette dernière s'élève principalement des régions équatoriales à cause des puissantes évaporations qui s'y produisent et par le régime régulier des vents alizés, il se forme des courants d'électricité positive allant de l'équateur vers les pôles. On a donc là une charge d'électricité positive qui s'écoulera vers la terre en se combinant avec son électricité négative. Comme le potentiel électrique sera sensiblement égal au nord et au sud par suite de la conductibilité presque uniforme de la terre, les décharges pourront se produire simultanément aux deux pôles.

De la Rive a pu reproduire le phénomène des aurores avec un appareil qui se compose (fig. 87) d'une sphère de bois S supportée par les tiges de fer doux F, F' d'un électro-aimant $E E'$; deux autres tiges également en fer doux $f f'$ traversent les pôles de la sphère et leurs extrémités libres sont enfermées dans deux cylindres de verre $C C'$ pourvus de robinets $r r'$ et dans lesquels on peut par suite faire le vide au degré voulu ou y introduire divers gaz. Dans ces deux manchons de verre $C C'$ se trouvent deux petits cercles métalliques $m m'$ qui entourent sans les toucher les extrémités des fers doux formant l'axe de la sphère. Deux bandes de papier buvard entourent la sphère, l'une suivant la ligne équatoriale $S S'$, l'autre, perpendiculairement, suivant la ligne des pôles et cette dernière bande porte de petites vis de cuivre $V V' V''$..... que l'on peut faire aboutir deux par deux à un galvanomètre.

On humecte d'eau salée les bandes de papier buvard et on met la bande équatoriale en contact avec l'électrode

négative d'un appareil Ruhmkorff, tandis que l'électrode positive va communiquer en même temps aux deux cercles métalliques des cylindres de verre dans lesquels on a raréfié l'air. On voit, aussitôt que les fers doux sont aimantés, des rayons lumineux s'élancer des cercles métalliques puis s'épanouir en arc et tourner avec une rapidité plus ou moins grande. Enfin le galvanomètre, qui est en relation avec la sphère, dévie et indique la présence de courants dérivés

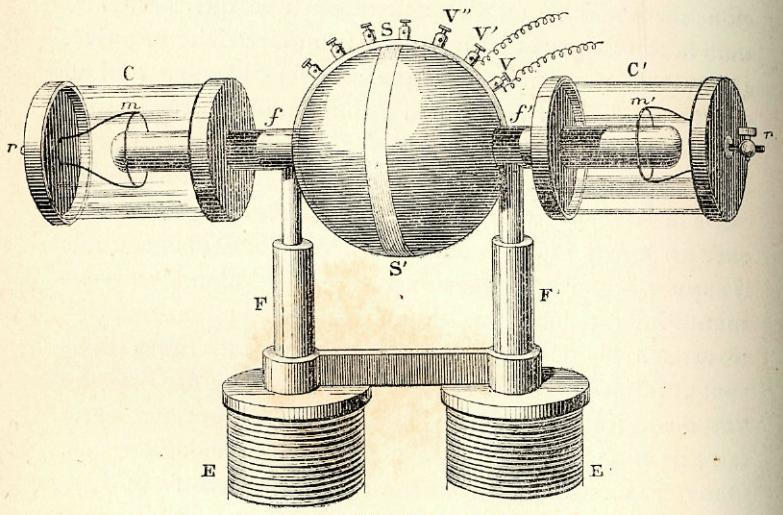

Fig. 87.

dont l'intensité est proportionnelle à la force et à la quantité des décharges et dont le sens varie suivant le pôle où ont lieu ces décharges (1).

II. — Nous savons que M. Luvini attribue l'origine de l'électricité atmosphérique au frottement des particules glacées entraînées par la violence des mouvements atmosphériques dans les régions supérieures et dispersées dans les couches d'air. Les décharges ont lieu, suivant le savant italien, de la même manière dans les aurores et dans les orages, la seule différence consiste dans l'intensité et la lumière des aurores est due à ces décharges dans l'air raréfié.

(1) *Comptes rendus de l'Acad. des Sciences pour 1862* et *Archives de Genève, 1862*.

« Les particules électrisées, dit M. Luvini, qui constituent la matière de l'aurore sont dans une agitation continuelle. Emportées par les vents dans toutes les directions, elles traversent des lignes de force et des champs magnétiques d'intensités différentes. La force électromotrice engendrée par l'induction magnétique due à cette agitation s'ajoute à celle qui agit sur les électricités contraires des particules électrisées, ce qui non-seulement facilite les décharges, mais tend, en outre, à les diriger dans le sens de l'action magnétique terrestre. Les décharges aurorales qui se manifestent dans des masses d'air agitées dans tous les sens éclatent confusément dans toutes les directions. Elles donnent lieu à une lumière nuancée nébuleuse, et constituent les plaques aurorales et les arcs nébuleux.

« Lorsque la matière de l'aurore est emportée par un vent de direction constante, les décharges tendent à prendre une direction commune et engendrent les rayons de l'aurore. La zone où les arcs nébuleux apparaissent ordinairement est celle qui correspond à la plus grande densité des lignes de force magnétique. Cette zone s'etend circulairement à une certaine distance et autour du pôle magnétique au-dessus d'un pays où tout concourt à faciliter la formation des cristaux de glace.

« Un vent assez fort dirigé d'occident en orient ou d'orient en occident, dans la région des aurores, déterminera la formation de rayons sensiblement parallèles à l'aiguille d'inclinaison. Il suffit qu'une décharge électrique

négative d'un appareil Ruhmkorff, tandis que l'électrode positive va communiquer en même temps aux deux cercles métalliques des cylindres de verre dans lesquels on a raréfié l'air. On voit, aussitôt que les fers doux sont aimantés, des rayons lumineux s'élancer des cercles métalliques puis s'épanouir en arc et tourner avec une rapidité plus ou moins grande. Enfin le galvanomètre, qui est en relation avec la sphère, dévie et indique la présence de courants dérivés

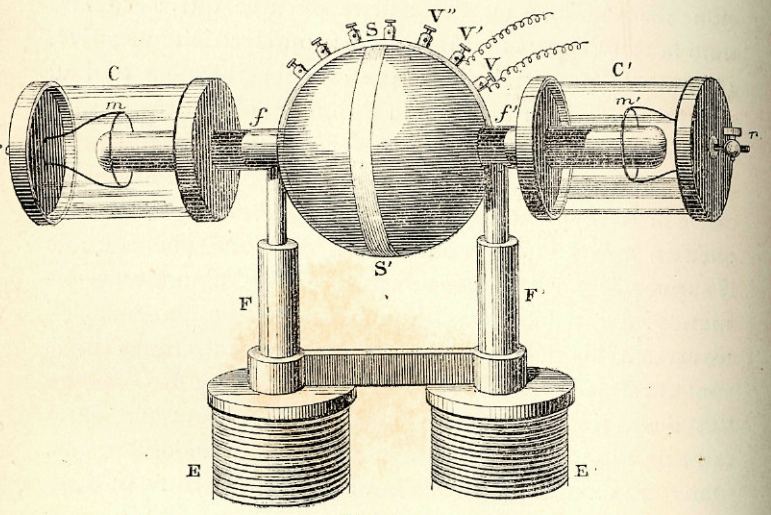

Fig. 87.

dont l'intensité est proportionnelle à la force et à la quantité des décharges et dont le sens varie suivant le pôle où ont lieu ces décharges (1).

II. — Nous savons que M. Luvini attribue l'origine de l'électricité atmosphérique au frottement des particules glacées entraînées par la violence des mouvements atmosphériques dans les régions supérieures et dispersées dans les couches d'air. Les décharges ont lieu, suivant le savant italien, de la même manière dans les aurores et dans les orages, la seule différence consiste dans l'intensité et la lumière des aurores est due à ces décharges dans l'air raréfié.

(1) *Comptes rendus de l'Acad. des Sciences pour 1862* et *Archives de Genève, 1862.*

« Les particules électrisées, dit M. Luvini, qui constituent la matière de l'aurore sont dans une agitation continuelle. Emportées par les vents dans toutes les directions, elles traversent des lignes de force et des champs magnétiques d'intensités différentes. La force électromotrice engendrée par l'induction magnétique due à cette agitation s'ajoute à celle qui agit sur les électricités contraires des particules électrisées, ce qui non-seulement facilite les décharges, mais tend, en outre, à les diriger dans le sens de l'action magnétique terrestre. Les décharges aurorales qui se manifestent dans des masses d'air agitées dans tous les sens éclatent confusément dans toutes les directions. Elles donnent lieu à une lumière nuancée nébuleuse, et constituent les plaques aurorales et les arcs nébuleux.

« Lorsque la matière de l'aurore est emportée par un vent de direction constante, les décharges tendent à prendre une direction commune et engendrent les rayons de l'aurore. La zone où les arcs nébuleux apparaissent ordinairement est celle qui correspond à la plus grande densité des lignes de force magnétique. Cette zone s'etend circulairement à une certaine distance et autour du pôle magnétique au-dessus d'un pays où tout concourt à faciliter la formation des cristaux de glace.

« Un vent assez fort dirigé d'occident en orient ou d'orient en occident, dans la région des aurores, déterminera la formation de rayons sensiblement parallèles à l'aiguille d'inclinaison. Il suffit qu'une décharge électrique

ait lieu dans un point d'une ligne ayant cette direction pour que le mouvement électrique et une série de décharges se propagent sur toute la ligne et de proche en proche, sur les lignes latérales, dans un sens ou dans l'autre, et parfois dans les deux sens alternativement. Lorsque ces rayons se superposent à un arc, on a le phénomène de l'arc rayé ou d'une bande. » (1)

C'est pourquoi, d'après la théorie de M. Luvini, le lieu habituel des aurores serait près des pôles car l'air y est très riche en cristaux de glace et c'est là que le champ magnétique terrestre est le plus intense; puis, comme il le fait lui-même remarquer, on doit conclure que le magnétisme terrestre et l'aurore polaire ont une origine différente et indépendante l'une de l'autre; toute la corrélation qui existe entre les deux phénomènes, c'est que le magnétisme exerce une action directrice sur les décharges aurorales et que l'aurore réagit sur le magnétisme en modifiant la direction et l'intensité de sa force.

III. Quant à M. Edlund, il fait intervenir, comme nous l'avons vu dans les origines de l'électricité atmosphérique, l'induction unipolaire qui est, par suite, la base de sa théorie sur les aurores polaires; voici son raisonnement (fig. 88): Etant donné un aimant à position verticale, mobile autour d'un axe et entouré d'un manchon métallique également mobile, si l'on fait passer le courant d'une pile dans ce manchon de manière à ce que l'une des électrodes soit en contact près du pôle de l'aimant et que la deuxième électrode soit placée en dessous, le manchon entre en rotation autour de l'aimant; celui-ci reste immobile et le courant

(1) *Comptes Rendus de l'Acad. des Sciences pour 1888*. T. I.' (Séance du 28 mai.)

n'exerce sur lui aucune action rotatoire. Il est donc possible de faire tourner mécaniquement l'aimant autour de son axe sans que l'action réciproque de l'aimant et du courant y porte le moindre obstacle. Si l'on enlève la pile et qu'on la remplace par un galvanomètre inséré entre les deux électrodes, le galvanomètre indique la présence d'un courant, dès qu'on met mécaniquement le manchon en rotation. Cette espèce d'induction a reçu le nom d'induction unipolaire; le courant est proportionnel à la vitesse du manchon et change de sens en même temps que la rotation; l'aimant peut être remplacé par un solenoïde. Si l'on retire ensemble

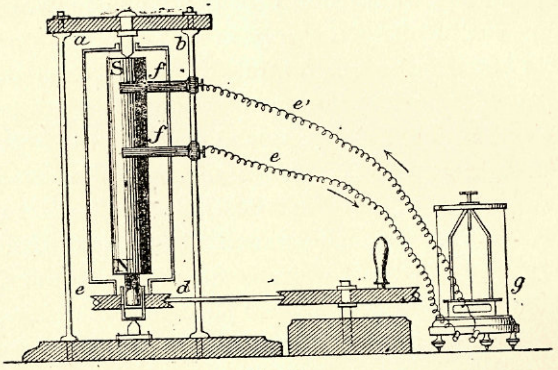

Fig. 88.

l'aimant et le manchon, il n'en résulte aucune variation dans le courant; on peut donc diminuer autant que l'on veut le diamètre du manchon, le rapprocher de l'aimant et même l'enlever complètement: les électrodes s'appuient alors sur l'aimant et l'induction se produit quand même, car la surface métallique de l'aimant joue le rôle de manchon. Ces phénomènes d'induction unipolaires furent produits la première fois par Weber en 1841. (1)

(1) *Ann. de Pogg.*, T. LII, p. 353.

M. Edlund explique cette induction : Tout corps contient les deux fluides électriques à l'état libre et particulièrement le fluide positif. Ce fluide sera entraîné par la rotation imprimée à ce corps qui se trouve alors entouré d'une espèce de courant électrique positif.

M. Edlund applique alors la loi connue de l'effet d'un pôle magnétique sur un élément de courant et l'induction unipolaire produite par la rotation de la terre devient la cause de l'électricité atmosphérique, de sa distribution et provoque la production des aurores polaires.

En effet, il démontre que le fluide électrique de l'atmosphère tend à prendre une direction de l'équateur vers le nord pour l'hémisphère boréal et de l'équateur vers le sud pour l'hémisphère austral. M. Edlund considère donc l'électricité atmosphérique positive comme dirigée de l'équateur vers les pôles, tandis que la terre électro-négative est parcourue par des courants allant des pôles vers l'équateur.

A l'équateur, l'aiguille d'inclinaison est horizontale et l'action du magnétisme terrestre sur un élément de courant situé dans l'atmosphère s'opère ici dans une direction verticale de bas en haut et cette action, en plus de la résistance électrique des couches d'air inférieures, s'oppose à l'écoulement du fluide positif de l'atmosphère vers la terre. C'est pourquoi il y aura dans les régions équatoriales des décharges disruptives très fréquentes. Sous les latitudes supérieures, l'aiguille d'inclinaison forme un angle plus ou moins grand avec le plan horizontal, il est donc possible au fluide électro-positif de l'atmosphère de descendre vers la terre sans que le magnétisme terrestre y mette directement obstacle. Enfin, au pôle magnétique, l'aiguille d'inclinaison prend une position verticale et par suite, la

résistance opposée par le magnétisme terrestre à la propagation du courant électrique dans le sens vertical est égale à zéro.

M. Edlund se résume en disant que la résistance à l'écoulement du fluide électrique de l'atmosphère vers la terre est plus grande à l'équateur que dans les régions situées à une certaine distance du cercle polaire et que cette résistance diminue avec l'accroissement de l'inclinaison magnétique. (1) Les aurores seront donc plus fréquentes à mesure que l'on s'approche des pôles pour devenir presque continuelles aux pôles magnétiques, c'est-à-dire au point du plus facile écoulement. C'est pour cela, suivant M. Edlund, que l'on ne trouve aucune trace d'électricité dans les régions polaires (2) et que l'air semble conduire l'électricité avec une extrême facilité.

IV. M. Lemtsröm adopte en partie les idées de M. Edlund mais il ajoute que chaque corps détaché de la terre devant être électrisé positivement par l'induction unipolaire, il s'ensuit que la vapeur d'eau doit être positive et la vaporisation devient alors par l'intermédiaire de l'induction unipolaire une source d'électricité atmosphérique. Cette électricité positive s'étend dans les régions raréfiées au-dessus de l'atmosphère, comme un immense conducteur sphérique qui entoure la terre négative, considérée comme un second conducteur. La distance qui sépare ces deux sphères n'est pas égale partout car la hauteur de l'atmosphère est moins grande aux pôles qu'à l'équateur et M. Lemström calcule que la résistance opposée à l'écoulement de l'électricité sera de 20 pour 100 moins considérable

(1) *Recherches sur l'induction unipolaire à l'aurore boréale*, Edlund, p. 21 et 30, Stockolm, 1878.

(2) Voir p. 60.

aux pôles qu'aux régions équatoriales. « Une des causes principales de l'accumulation de l'électricité vers les pôles se trouve, dit-il, dans la position réciproque des deux conducteurs ». C'est donc un courant électrique de haut en bas, de l'atmosphère vers la terre, qui engendre l'aurore polaire et les décharges se produisent plus facilement si une certaine quantité de vapeurs d'eau amenée par un vent du sud diminue encore la résistance des couches d'air et les rend meilleurs conducteurs.

« Le courant, dit M. Lemström, commence à s'écouler lentement des couches inférieures de l'air raréfié vers la terre ; l'équilibre électrique est rompu dans tout l'espace environnant où afflue une nouvelle quantité d'électricité qui vient remplacer celle qui s'est écoulée. C'est dans cet espace rempli d'air raréfié qu'apparaissent alors des rayons lumineux, conséquence du courant qui en général n'est point assez fort pour les produire dans les couches peu élevées de l'atmosphère. En amenant un courant électrique mobile dans toutes ses parties, dans le voisinage du pôle d'un barreau magnétique ce courant se placera par rapport au pôle, dans une position telle que la force magnétique sur lui sera nulle.

« Les rayons de l'aurore boréale ne sont autre chose que ces courants mobiles et par conséquent, sous l'influence du magnétisme terrestre, ils doivent se disposer de façon à rester parallèles à la direction de la force totale du magnétisme terrestre ; ils deviennent donc parallèles à l'aiguille d'inclinaison. A mesure qu'ils s'élèvent, ils doivent se rapprocher les uns des autres parce que des courants ayant même direction s'attirent mutuellement et cette attraction augmentera dans les régions les plus hautes puisque l'intensité du courant sera plus grande par suite de la diminution

de résistance. Ainsi s'explique la disposition si remarquable des rayons de l'aurore boréale. Mais le magnétisme terrestre ne peut aucunement être considéré comme la cause de la lumière polaire, il se borne à la production de l'induction unipolaire et à disposer dans un certain ordre les rayons lumineux déjà existants. » (1)

M. Lemström présenta en 1875 au Congrès international des sciences géographiques de Paris un appareil destiné à reproduire les phénomènes des aurores polaires (fig. 89). Cet appareil consiste en une série de dix tubes de Geissler, *S' S'' S'''*... à air raréfié jusqu'à 1/2 millimètre de pression, disposés en éventail au-dessus d'une sphère creuse en cuivre *C* garnie à sa partie supérieure de petites pointes qui correspondent à la direction des tubes de Geissler. L'extrémité supérieure des tubes communique à la terre par des fils métalliques *t' t'' t'''*...

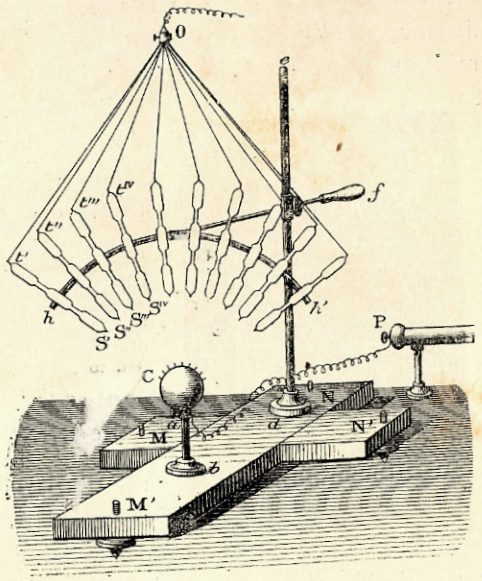

Fig. 89.

(1) *L'Aurore boréale*, Sélim Lemström, p. 153, 1886.

réunis en un seul *O*, le pôle négatif d'une machine électrique *P* est mis en rapport avec la sphère de cuivre, l'autre pôle est à la terre : les tubes et la sphère sont placés sur des supports isolants *MM' NN'*. Dès que la machine est mise en activité, on voit apparaître dans les tubes des lueurs qui offrent une ressemblance complète avec l'aurore boréale. « Dans des circonstances favorables, ajoute M. Lemström ces phénomènes se produisent encore à une distance de deux mètres quand on opère avec une bonne machine électrique ».

Fig. 90.

Pendant l'expédition suédoise de 1871, sur une montagne près d'Enare, M. Lemström réussit à produire un phénomène de lumière en forme de rayon au moyen d'un poteau dressé verticalement et orné de pointes disposées en couronnes et reliées à la terre.

L'expédition finlandaise de 1883-1884 lui fournit l'occasion de répéter ces expériences à l'aide d'un plus grand appareil d'écoulement, près du village de Sodankyla et sur le Pietarintunturi, près de Kultala ; on vit alors apparaître une lumière diffuse jaunâtre qui éclaira le sommet de la montagne. Un galvanomètre, mis en relation avec des fils supportés par des isolateurs Mascart à acide sulfurique, permit de reconnaître la présence de courants dérivés.

V. — Enfin Gaston Planté complète sa théorie de l'électricité atmosphérique par celle des aurores polaires. Ce

n'est plus comme pour MM. Edlund et Lemström un courant de haut en bas qui produit les aurores mais au contraire un courant de bas en haut; car d'après Planté, la terre positive émet de l'électricité positive et ne devient négative que momentanément et partiellement à la suite d'inductions exercées par le passage de nuages orageux

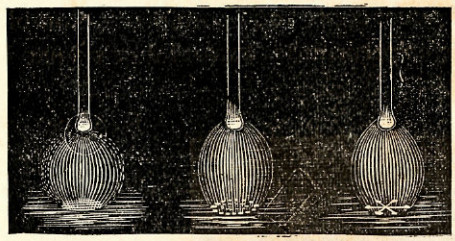

Fig. 91.

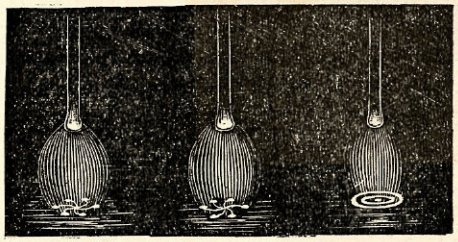

Fig. 92.

électrisés (1). Il base sa théorie, comme il l'a toujours fait, sur des expériences concluantes :

L'électrode négative d'une batterie secondaire de 400 couples plonge dans un vase rempli d'eau salée (fig. 90), dès que l'on met l'électrode positive en contact avec les parois humides de ce vase suivant qu'on l'enfonce plus ou moins on aperçoit : ou bien une couronne lumineuse dispo-

(1) Voir p. 111 et 114.

sée en cercle autour de l'électrode positive, ou bien un arc frangé de rayons brillants, ou une ligne sinueuse animée d'un rapide mouvement ondulatoire ou encore une suite d'ondes brillantes qui se succèdent sans interruption; enfin le liquide peut devenir complètement lumineux et entrer dans une violente ébullition; on peut encore obtenir des couronnes simples ou doubles (fig. 91 et 92), des rais formant une sorte de roue ou de voûte lumineuse d'un bleu cendré qui rappelle exactement les aurores décrites par M. Lemström.

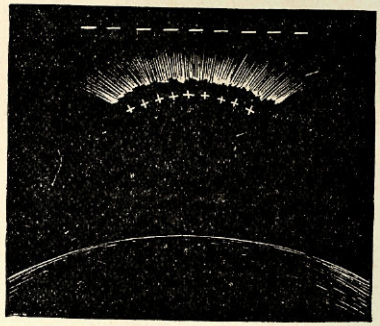

Fig 93.

Dans ces expériences tout est reproduit fidèlement : arcs et couronnes avec mouvements ondulatoires, couleurs, rayons, segment obscur, cercles lumineux, fluctuations de la lumière. formations des vapeurs, vents et bruissements, perturbations magnétiques.

Et tous ces phénomènes ne peuvent être produits, fait remarquer Planté, que par un flux *d'électricité positive* car l'électrode négative n'offre rien de semblable. Ce sont, d'après lui, les décharges de l'électricité positive de la terre vers les hautes régions de l'atmosphère dont le vide imparfait fonctionne comme une enveloppe conductrice et joue le rôle de l'électrode négative des expériences (fig. 93). L'électricité positive s'écoule vers les espaces planétaires, *et non vers le sol*, à travers les brumes et les nuages glacés qui flottent au-dessus des pôles.

C'est donc l'électricité de la terre, dégagée par voie d'émission et qui produit, suivant les conditions de conductibilité, des effets différents: des orages à l'équateur, des orages aux pôles : « L'évaporation y est très faible, dit Gaston Planté, la quantité d'électricité tendant à émaner du globe terrestre est, sans doute, moins abondante, car l'air moins humide à la surface du sol ou des mers de ces régions s'en charge avec moins de facilité; mais celle qui se dégage, s'élève directement dans les couches supérieures de l'atmosphère et forme ainsi une sorte de nappe électrisée tendant à se diffuser dans l'espace. »

« Si aucun amas humide conducteur ne vient s'interposer entre cet écoulement de l'électricité, à partir des régions déjà hautes de l'atmosphère vers des régions encore plus élevées, le flux électrique se décharge d'une manière obscure ou faiblement lumineuse; car la transition des couches d'air moins raréfiées aux couches plus raréfiées n'est pas brusque, mais graduelle. Son passage ne se révèle alors que par des perturbations magnétiques. »

« Si, au contraire, les amas nuageux à l'état de globules liquides ou de cristaux de glace flottent dans l'intervalle des effets lumineux se manifestent comme dans nos expériences et on observe des aurores polaires. » (1)

Si l'on met à part la théorie de la Rive qui explique insuffisamment la distribution de l'électricité dans l'atmosphère et les particularités des aurores, on se trouve en présence des théories de Luvini, Edlund, Lemström et Planté. Nous avons vu combien il est difficile d'admettre sans restriction celle de M. Luvini sur l'origine de l'électricité atmosphérique d'où dépend évidemment son système

(1) *Phén. élect. de l'atmosphère*, Gaston Planté, p. 158.

sur les aurores polaires. Quant au raisonnement de M. Edlund sur l'induction unipolaire, M. Exner l'a fortement ébranlé par ses expériences.

Il a fait induire un courant dans un conducteur fixe par un aimant animé d'un mouvement de rotation, il a mesuré ce courant, puis a imprimé au conducteur un mouvement aussi rapide que celui de l'aimant ; il ne s'est produit aucune induction et aucun courant dans le conducteur ; et cependant c'est l'image de l'atmosphère et du globe terrestre : « Or, d'après Edlund, dit M. Exner, on aurait dû constater un courant dans le conducteur animé du même mouvement de rotation. Sa théorie sur l'électricité, ajoute-t-il, ne saurait donc être admise puisqu'elle repose sur cette manière de comprendre l'induction unipolaire » (1).

On a donc à choisir entre la théorie de M. Lemström et celle de Planté ; entre un courant positif de l'atmosphère vers la terre négative et des décharges de l'électricité positive de la terre vers le vide des régions planétaires. Les raisons qui nous ont fait préférer les idées de M. Planté sur l'électricité atmosphérique subsistent quant aux aurores polaires. En outre, M. Lemström semble assimiler complètement les lueurs diffuses, feux St-Elme, etc... aux aurores polaires ; ce sont là, en effet, diverses manifestations électriques qui conservent leurs particularités caractéristiques tout en ayant une cause directe commune. Les lueurs aperçues par M. Lemström sur le sommet des montagnes ou au ras du sol, ou bien sont des aurores polaires, ou bien, elles rentrent dans la classe des décharges dites feux Saint-Elme, en tout cas, ce sont des lumières ou des

(1) *Comptes Rendus de l'Acad. des Sciences de Vienne* (Séance du 1er juillet 1886).

aigrettes produites par le rayonnement intense d'un flux électrique positif terrestre. (1).

Nous devons terminer ici ces études qui ne sont qu'un résumé rapide des principales manifestations de l'électricité naturelle et des discussions qu'elles ont fait naître.

Pour justifier entièrement le titre que nous avons donné a ce travail, il faudrait encore approfondir la question des courants terrestres et de leurs variations, rechercher le rôle de l'électricité dans les plantes, dans les animaux, dans l'homme, généraliser enfin et condenser ces différentes parties en un tout concluant. Mais on rencontre alors une phase mal définie, des études à peine ébauchées et dont les subtilités ne seraient que des hypothèses, fruits de l'imagination, au lieu de se présenter comme les résultats d'expériences et d'observations sérieuses. Quant à conclure, nous oserons encore moins l'essayer ; l'impuissance est ici complète, totale.

L'avenir scientifique éclaircira évidemment bien des points, dévoilera à coup sûr bien des mystères, nous donnera peut-être les moyens d'asservir cette électricité atmosphérique et terrestre, libre encore de toute entrave et qui remplacerait si aisément nos piles et nos machines. Mais actuellement nous nous heurtons à des obstacles infranchissables, l'obscurité nous environne et devant nous se dresse la porte close sur l'inconnu dont l'idée seule fait germer en notre esprit de tumultueuses pensées et des rêves d'infini.

Cependant nous en savons assez par les faits observés pour être persuadés du rôle prépondérant de l'électricité sur les phénomènes naturels. Si les perturbations atmos-

(1) Voir p. 66 et 188.

phériques et terrestres nous semblent différer dans leurs détails, elles peuvent se rattacher pourtant les unes aux autres, puisqu'en les étudiant attentivement on remarque le même mode de formation, la même marche dans leur développement. Elles s'enchaînent toutes, procèdent les unes des autres sans qu'il soit souvent possible de déterminer la première impulsion dominante et, dans cette unité de principe, cette concordance admirable, nous avons vu que l'on arrive sans peine à reconnaître une seule cause principale : l'électricité. On constate, en effet, partout sa puissante action, elle remplit tout dans la nature, rétablit par des orages, par des aurores polaires, l'équilibre rompu, assainit l'atmosphère par des pluies bienfaisantes qui la débarrassent de ses impuretés; elle vivifie les plantes, les animaux, les hommes, la création entière, elle est, on peut le dire, l'expression même de la vie universelle.

TABLE DES MATIÈRES

CHAPITRE I.

Electricité atmosphérique

Pages

I. **Présence de l'électricité dans l'atmosphère.** — Considérations générales. — Historique. — Priestley et ses hypothèses. — Expériences de Dalibard. — Première loi établie par Le Monnier..... 1

Appareils de vérification. — *Conducteurs.* — Leur action. — Recherches pour augmenter cette action. — Expériences de Romas, arc de Saussure..... 8

Les Electromètres. — Electromètres de Saussure, de Peltier, de Thomson-Branly. — Electromètre enregistreur de Mascart. Courbes obtenues. Essais de Beccaria, de Monnet. — Electromètre Palmieri..... 13

II. **Distribution de l'électricité dans l'atmosphère.** — Changements incessants dans la tension électrique de l'atmosphère. 36

Variations quotidiennes. — Maxima et minima diurnes et nocturnes..... 38

Variations annuelles..... 44

Variations suivant l'état du ciel..... 45

Signe de l'électricité atmosphérique..... 51

Potentiel..... 55

Distribution géographique. — Dans les régions polaires, dans les régions tempérées. — Dans les villes, en rase campagne. — Dans les pays tropicaux. — Influence sur les végétaux. — Manifestations visibles de l'électricité atmosphérique en temps serein..... 59

Pages

Distribution suivant l'altitude. — Observations de M. Palmieri, du P. Denza. — Objections. — Historique de la question. — Expériences de Becquerel, de Biot et Gay-Lussac. — Proposition de M. Marcillac. — Causes de la suspension des nuages dans l'atmosphère suivant M. Oltramare et d'après Bertholon..... 67

III. **Electricité cosmique.** — L'électricité des espaces interplanétaires..... 78

Comètes..... 79

Nébuleuses..... 81

Soleil et taches solaires. — Expériences de Planté, analogies. — Propositions de M. Zenger. — La gravitation universelle remplacée par une action électro-dynamique du soleil. — Suppositions vraisemblables..... 83

Influence des taches solaires sur le magnétisme terrestre et l'électricité atmosphérique. — Concordances. — Observations de MM. Luvini, Flammarion, Marchand, Zenger, etc..... 91

IV. **Origines de l'électricité atmosphérique.** — Classification des systèmes..... 96

Frottement. — Théories de Hoppe, de Jordan, de Andries, de Luvini, de Legoarant de Tromelin..... 97

Evaporation. — Volta et Saussure, Pouillet, Becquerel, Arrhénius, Lecher, Shonbein, Palmieri, Objections de Luvini. — Théorie de Edlund..... 102

Emission. — Beccaria, Rowland — Planté, Peltier, Pellat, Expériences de Palmieri sur le signe de l'électricité du sol. — Résumé..... 110

CHAPITRE II.

Orages

Description d'un orage..... 117

I. **Formation des nuages orageux.** — Origines des orages. — Théorie de M. Jundel. — Objections de M. Faye. — Tourbillons aériens. — Fonctionnement d'un orage. — Observations de M. Colladon..... 120

II. **Hauteur et constitution des nuages orageux.** — Causes

Pages

des coups de foudre répétés en un même point. — Rôle de la pluie dans les orages, d'après M. Colladon, suivant M. Palmieri. — Observations diverses..... 125

III. **Distribution des orages.** — Dans les régions du nord. — En Europe. — A l'équateur. — Nombre des orages à la Jamaïque, en Ethiopie. — Influence des terrains..... 130

IV. **Variations des orages.** — Accroissement ou diminution. — Dans les villes, dans les campagnes. — Influence des poussières atmosphériques..... 134

V. **Heures et saisons des orages.** — Dans les diverses contrées. — Les orages d'hiver..... 137

VI. **Orages volcaniques.** — Caractères distinctifs. — Observations de MM. Faye, Palmieri et de G. Planté..... 139

VII. **Relations entre les orages et les taches solaires.** — Coïncidences. — Influence de la photosphère sur les perturbations terrestres..... 142

VIII. **Eclairs.** — Fonctionnement. — Chemin suivi par la foudre. — Couleur de l'éclair. — Instantanéité ou durée. — Forme. — Eclairs et étincelles. — Analogies..... 144

1° *Eclairs rectilignes*..... 149

2° *Eclairs sinueux.* — Zigzags ou spirales. — Observations de foudre en hélice. — Conclusions de MM. de Fonvielle, Moussette et Planté..... 149

3° *Eclairs ramifiés.* — Observations..... 154

4° *Eclairs diffus.* — Eclairs sans tonnerre. — Observations de MM. d'Abaddie, Palmieri, Renou, etc... — Eclairs de chaleur. — Lueurs diffuses..... 157

5° *Foudre globulaire.* — Premières théories. — Divers exemples. — Remarques de M. Mascart. — Caractères de la foudre globulaire. — Théorie de du Moncel. — Objections. — Expériences de Planté. — Explication détaillée du phénomène..... 162

6° *Eclairs en chapelets.* — Fragments globulaires. — Proposition de Planté. — Diverses observations. — Généralisation des éclairs en foudre globulaire..... 177

7° *Bolides.* — Assimilation de certains bolides. — Théorie de M. Oltramare..... 182

IX. **Phénomènes d'induction.** — Tension électrique pendant les orages. — Observations de MM. Palmieri et Denza. — Expériences téléphoniques. — Feux Saint-Elme. — Premières hypothèses. — Diverses manifestations. — Y a-t-il des cas de foudre ascendante ?..... 185

Pages

X. **Tonnerre.** — Diverses explications. — Théorie de Pouillet. Distinctions et observations. — Probabilités.. 194
XI. **Effets de la foudre**..... 196
1° *Effets de fusion*. — Tubes fulminaires ou fulgurites. — Quelques cas particuliers de fusion..... 197
2° *Effets physiologiques* — Mort foudroyante. — Attitude après la mort. — Causes principales des morts par la foudre. — Immunité des trains sur les chemins de fer. — Précautions à prendre. — Soins à donner aux foudroyés..... 201
3° *Effets de la foudre sur les arbres*. — Fonction des arbres en temps orageux. — Différents effets sur les différentes essences. — Causes. — Résumé. — Les arbres considérés comme des paratonnerres..... 207

CHAPITRE III

Paratonnerres

Historique. — Franklin et Prokop Diswisch. — Moyens de protection dans l'antiquité. — Au Moyen-Age. — Première application en France du paratonnerre. — Les diverses commissions et les instructions sur les paratonnerres..... 213
I. **Tige.** — Les premières tiges. — Modification de Pouillet. — Pointes aiguës ou obtuses. — Matière de la tige. — Longueur. — Tiges pleines et tiges creuses. — Tiges en charbon. — Tiges à disques. — Nombre des tiges..... 218
II. **Conducteurs** — Liaison de la tige au conducteur. — Barres. câbles et chaînes. — Cuivre ou fer. — Raccord des pièces métalliques au conducteur. — Conséquences des mauvaises jointures. — Rubans de cuivre. — Leurs avantages. — Les paratonnerres à bord des navires..... 223
III. **Communication avec le sol.** — Puits spécial. — Raccordement avec les conduites d'eau et de gaz. — Perd-fluide. — Modifications diverses..... 227
IV. **Paratonnerres à pointes multiples.** — Fusinieri, Perrot et Melsens. — Description du paratonnerre Melsens. — Ses effets. — Ses avantages. — Installations diverses. — Les paratonnerres de la Tour Eiffel..... 230

Pages

V. Action des paratonnerres. — Action préventive. — Action préservatrice. — Extension de l'une ou de l'autre de ces actions 234
VI. **Zone de protection.** — D'après l'ordonnance de 1823. — Suivant Snow Harris, Pouillet, Melsens. — Diminution constante de cette zone 237
VII. **Vérifications des paratonnerres.** — Insuffisance des galvanomètres et de la simple sonnerie. — Pont de Wheastone. — Pont de Nippoldt à téléphone. — Calcul de la conductibilité des conducteurs et de la résistance du sol. — Système de F. Michel. — Considérants de M. Miesler. — Expériences de M. Lodge. — Déductions. — Analyse des tiges..... 239
VIII. **Efficacité des paratonnerres.** — Poudrières. — Efficacité en cas de foudre globulaire. — Conclusion..... 245

CHAPITRE IV

Grêle

Propositions générales. — Présence de l'électricité dans les orages à grêle. — Couleur des nuages orageux. — Expériences de M. Shelford Bidwell..... 249
I. **Particularités des orages de grêle.** — Leur nombre suivant les saisons. — L'heure préférée. — Formation des orages de grêle. — Marche et étendue des nuages à grêle. — Leur hauteur. — Bruit qui accompagne la chute des grêlons. — Tension électrique de l'atmosphère. — Manifestations électriques. — Grêlons phosphorescents. — Grains de grésil électrisés. — Les formes des cristaux neigeux... 252
II. **Aspect et composition des grêlons.** — Grosseur. — Formes. — Sphères irrégulières. — Lentilles. — Grêlons sphériques. — Grêlons cristallisés. — Colorations en bleu et en rouge. — Causes probables de ces colorations..... 259
III. **Théories de la grêle.** — Questions à résoudre. — Explication de Descartes, du P. Regnault. — Théorie de Volta. — Remarques de Nodon. — Composition des cirrus. — Observations de Pouillet. — Discussion de ces observations. — Loi des tempêtes formulée par M. Faye. — Mouvements tourbillonnaires. — Observations à l'appui. — Courants ascendants

INSTITUTO DE FÍSICA DA U.F.R.J. BIBLIOTECA

Pages

ou courants descendants. — Théories Cousté, Oltramare, Renou. — Surfusion. — Théorie Colladon. — Expériences de Bertholon et de Planté. — Déductions et analogies. — Résumé. — Les paragrêles. — Influence des terrains sur la formation des nuages à grêle..... 264

CHAPITRE V

Trombes, Tornades et Cyclones

Définitions générales..... 289

. **Trombes.** — Descriptions anciennes..... 291

1° *Principaux caractères des trombes.* — Formation des trombes terrestres et des trombes marines. — Leur action destructive. — Leurs formes. — Trombes en spirales. — Bruit causé par les trombes. — Phénomènes électriques des trombes.. . 293

2° *Théories des trombes.* — Brisson. — Perrin. — Courants tourbillonnaires. — Théorie de M. Faye. — Trombes descendantes et ascendantes. — Reproduction en miniature des trombes par MM. Colladon, Wehyer, Martinez Ancira. — Rôle de l'électricité dans les trombes. — Expériences de Planté..... 300

II. **Tornades.** — Description..... 317

Gyrations des tornades. — Vitesse de translation. — Leur formation..... 317

Exemples de tornades..... 319

Rôle de l'électricité dans les tornades. — Observations de M. Finley. — Manifestations électriques. — Tourbillons de poussière. — Observations du docteur Baddeley..... 320

III. **Cyclones.** — Définition. — Lois régissant les cyclones.. 328

Formation des cyclones. — Description. — Centre du cyclone. — Demi-cercle maniable et demi-cercle dangereux. — Effets des cyclones..... 330

Phénomènes électriques pendant les cyclones. — Potentiel au centre du cyclone. — Distribution suivant les saisons..... 332

Expériences de Planté. — Conséquences..... 336

Raz de marée après les cyclones..... 338

Relations entre les taches solaires et les cyclones..... 339

CHAPITRE VI

Tremblements de terre

Pages

Considérations générales..... 341

I. Courants telluriques et variations du magnétisme terrestre. — Causes. — Lemström. — Blavier. — Balfour-Stewart. — Relations. — Résumé..... 342

II. **Caractères principaux des tremblements de terre.** — Oscillations. — Crevasses. — Effondrements. — Foyer d'ébranlement. — Bruits caractéristiques. — Vitesse de propagation du bruit. — Etendue de la surface agitée. — Phénomènes connexes. — Raz de marée. — Sources. — Jets d'eau. — Régions habituellement dévastées..... 351

III. — **Théories des tremblements de terre.** — Le séismographe. — Etude de la direction générale des oscillations. — Les tremblements de terre et les éruptions volcaniques. — Théories de Mallet, de Poulett-Scrope, de Daubrée. — Hypothèse de M. Lallemant. — Influences extra-terrestres. — Classifications diverses..... 358

IV. **Phénomènes atmosphériques.** — Coïncidences observées. — Remarques particulières..... 362

V. **Phénomènes magnétiques.** — Variations de l'aiguille aimantée pendant les tremblements de terre. — Etudes de Luvini. — Notes de M. Fines. Observations de MM. Mascart et Descroix..... 366

VI. **Phénomènes électriques.** — Effets lumineux. — Effets d'induction. — Effets physiologiques. — Observations et remarques..... 369

VII. **Théories électriques des tremblements de terre.** — Déductions de Priestley, de Bertholon, de Brisson. — Le séismoscope magnétique des Japonais. — Remarque de M. Virlet-d'Aoust. — Proposition de M. Naudin. — Hypothèse Planté. — Certains tremblements de terre considérés comme résultant d'une action directe de l'électricité terrestre. — Théorie. — Preuves à l'appui. — Bruits microphoniques. — Influence sur les orages. — Présence de l'ozone. — Courbes magnétiques,

Pages

courbes isoséismiques. — Composition géologique des terrains. — Commotions dans les couches superficielles..... 373

CHAPITRE VII

Aurores polaires

Définition 387

I. **Description et caractères des aurores.** — Dans les pays tempérés. — Teinte uniforme. — Arc. — Segment obscur. — Lueurs aurorales. — Formes. — Dans les régions polaires. — Couleurs et formes diverses. — Mouvement des aurores. — Bruissement. — Hauteur et visibilité des aurores. — Les aurores boréales et australes. — Nombre des aurores suivant les différents mois de l'année. — Suivant les saisons..... 388

II. **Concordance de certains phénomènes avec les aurores polaires.** — Agitation de l'aiguille aimantée. — Orages magnétiques. — Observations diverses. — Remarques de Planté. — Courants telluriques. — Induction dans les lignes télégraphiques. — Les aurores polaires et les taches solaires. — Coïncidences..... 399

III. **Théories des aurores polaires.** — Hypothèse de Euler, de Mairan, de Haüy, etc... — Premières théories électriques. — Théorie de la Rive, son appareil. — Lois de Luvini. — Théorie de Edlund. — Induction unipolaire. — Recherches de Lemström, ses déductions, son appareil de production des aurores. — Expériences de Planté. — Conclusions..... 405

INDEX ALPHABÉTIQUE

A.

Pages

Accroissement ou diminution des orages..... 134
Action des arbres foudroyés sur les bous-soles..... 211
Action des arbres sur l'électricité atmosphérique..... 61, 135, 207
Action des conducteurs fixes..... 9
Action des électromètres. 14, 36
Action préservatrice des paratonnerres..... 237
Action préventive des paratonnerres..... 234
Adultérations des tiges des paratonnerres..... 244
Aérostats et l'électricité atmosphérique (Les)... 13, 73
Appareils de reproduction des aurores polaires..... 409, 417, 419
Appareil de vérification pour l'électricité atmosphérique..... 8
Appareil de vérification des paratonnerres 239
Arbres (Effet de la foudre sur les)..... 207
Aspect des grêlons..... 259
Assimilation des éclairs aux étincelles..... 147
Attitudes des corps en cas de mort foudroyante.. 202
Aurores boréales et australes 397
Aurores polaires..... 387
Aurores polaires et variations du magnétisme terrestre..... 399
Avantages des paratonnerres à pointes multiples.. 231

B

Blessures causées par la foudre. 202
Bolides et foudre globulaire..... 182
Bruissement des aurores 394
Bruit caractéristique des tremblements de terre. 353
Bruit de la grêle..... 255
Bruit produit par les trombes..... 298

C.

Pages

Calcul de la conductibilité des paratonnerres... 239
Caractères des aurores polaires..... 388
Caractères principaux des tremblements de terre. 351
Caractères principaux des trombes..... 293
Causes principales des morts par la foudre... 200
Causes des courants telluriques et des variations du magnétisme terrestre..... 344
Centre des cyclones...330, 333
Chemin suivi par la foudre..... 144
Classifications des éclairs 148 162
Classification des effets de la foudre..... 197
Classifications diverses des tremblements de terre..... 360
Collier de prise du courant..... 223
Colorations des grêlons. 263
Comètes..... 79
Commissions des paratonnerres..... 217
Commotions séismiques ressenties dans les couches superficielles ... 383
Communications des paratonnerres avec le sol..... 228
Composition des cirrus. 268
Composition des grêlons 259
Composition des terrains et les orages (La)..... 132
Composition des terrains et les tremblements de terre (La)..... 381
Conducteurs des paratonnerres 223
Conducteurs fixes..... 8
Conséquences des paratonnerres mal établis.. 225
Considérations générales sur l'électricité....1, 90, 423
Constitution des nuages orageux..... 126
Couleur des aurores polaires.....388 391
Couleur des éclairs..... 146
Couleur des nuages à grêle 251
Coups de foudre en un même point..... 126
Courants ascendants et courants descendants 272, 274, 305
Courants telluriques..342. 400
Courbes de l'électromètre Mascart..... 26
Courbes magnétiques et courbes isoséismiques. 380
Cyclones..... 328

D.

Demi-cercle maniable ou dangereux d'un cyclone 331
Description d'aurores polaires 388
Description de cyclones.....330, 333
Description de tornades 317
Description de trombes. 293
Description d'un orage.. 117

Pages

Description d'un orage à grêle 253
Diffusion de l'éclair..... 157
Dimension des nuages à grêle..... 254
Direction générale des tremblements de terre. 358
Distinction à établir entre les tremblements de terre.....360, 377
Distribution de l'électricité dans l'atmosphère. 36
Distribution de l'électricité atmosphérique suivant la latitude..... 59
Distribution de l'électricité atmosphérique suivant l'altitude..... 67
Distribution des aurores polaires..... 398
Distribution des cyclones 335
Distribution des orages. 130
Distribution des orages à grêle..... 252
Distribution des tremblements de terre.....358, 380

E.

Eclairs..... 144
Eclairs de chaleur..... 159
Eclairs diffus 157
Eclairs en boule..... 162
Eclairs en chapelet..... 177
Eclairs en hélice..... 150
Eclairs ramifiés..... 154
Eclairs rectilignes..... 149
Eclairs sinueux..... 149
Effets de fusion..... 197
Effets de la foudre..... 196
Effets d'induction..... ....161,185, 370 379
Effets physiologiques..201, 379
Efficacité des paratonnerres..... 245
Electrisation des nuages..... 45, 120, 251
Electromètre Mascart.... 20
Electromètre Palmieri .. 28
Electromètre Peltier..... 16
Electromètre de Saussure 15
Electromètre Thomson-Branly 19
Emission (Origines de l'élect. atm.)..... 110
Epreuve des paratonnerres..... 239
Espaces interplanétaires. 78
Etendue de la surface agitée par les tremblements de terre..... 356
Evaporation (Origines de l'élect. atm.)..... 102

F.

Feux Saint-Elme..188, 193. 422
Fonction des arbres pendant les orages..61, 207, 287
Fonctionnement de l'éclair..... 144
Formation des aurores polaires..... ... 388, 391
Formation des cristaux de neige..... 259
Formation des cyclones.. 330
Formation des grêlons dans les nuages... ... 264
Formation des nuages orageux..... 120
Formation des orages de grêle 253
Formation des tornades. 317

Pages

Formation des trombes. 293
Forme des grêlons 261
Formes diverses des éclairs 147
Foudre ascendante..... 191
Foudre globulaire....162, 246
Foyer d'ébranlement des tremblements de terre 352
Fragments globulaires.. 178
Frottement (Origines de l'élect. atm.)..... 97
Fulgurites 197

G.

Grains de grésil électrisés 258
Gravitation universelle et l'électricité (La)..... 89
Grêle 249
Grêlons bleus et grêlons rouges..... 263
Grêlons électrisés..... 258
Grêlons phosphorescents 257
Grosseur des grêlons... 259
Gyrations des cyclones.. 330
Gyrations des nuages à grêle..... 272
Gyrations des tornades.. 317
Gyrations des trombes 294, 305

H.

Hauteur des aurores polaires 395
Hauteur des nuages orageux 125
Hauteur des nuages à grêle..... 255
Heures et saisons des orages..... 137

Pages

Heures et saisons des orages de grêle..... 253
Historique de l'électricité atmosphérique 1
Historique des paratonnerres 213

I. — J. — K.

Induction de la terre par le soleil.....91, 344
Induction des conducteurs fixes.....9, 113
Induction des paratonnerres 234
Induction pendant les aurores polaires 399
Induction pendant les orages.....161,185
Induction pendant les tremblements de terre 370, 379
Induction unipolaire.... 412
Influence de l'électricité sur les végétaux..... 62
Influence des arbres sur l'électricité atmosphérique.....61, 135, 207, 287
Influence des poussières sur la formation des orages 135
Influence des terrains sur la formation des orages 132
Influence des terrains et des cours d'eau sur la formation de la grêle. 288
Influence des terrains sur les tremblements de terre..... 381
Instantanéité de l'éclair. 147

L.

Pages

Liaison de la tige des paratonnerres au conducteur..... 223
Loi de Ohm et les paratonnerres (La)..... 242
Lois qui régissent les cyclones..... 328
Longueur des éclairs..155, 196
Longueur de la tige d'un paratonnerre..... 218
Lueurs aurorales..... 389

M.

Magnétisme terrestre...91, 342
Manifestations électriques des cyclones..... 332
Manifestations électriques des orages..... 188
Manifestations électriques des orages de grêle.... 256
Manifestations électriques des tornades..... 320
Manifestations électriques des tremblements de terre..... 369
Manifestations électriques des trombes..... 299
Morts foudroyantes..... 202
Mouvement des aurores polaires..... 394
Moyen de protection contre la foudre dans l'antiquité et au moyen-âge 215

N.

Nappes lumineuses observées pendant un orage.....161, 189
Nébuleuses..... 81

O.

Pages

Œil de la tempête....330, 337
Orages..... 117
Orages de grêle..... 251
Orages d'hiver..... 138
Orages magnétiques..... 400
Orages volcaniques..... 139
Origines de la foudre globulaire..... 170
Origines de l'électricité atmosphérique..... 96
Origines des aurores polaires..... 405
Origines des cyclones.. 336
Origines des orages...120, 132
Origines des tornades... 326
Origines des trombes... 300
Origines des tremblements de terre.....358, 373
Ozone et les tremblements de terre (L')..... 380

P.

Paragrêles..... 287
Paratonnerres..... 213
Paratonnerres à pointes multiples..... .. 230
Paratonnerre en cas de foudre globulaire (Le). 246
Paratonnerres de la Tour Eiffel 323
Paratonnerres des navires..... 226
Paratonnerres des poudrières..... 245
Paratonnerre naturel (Un) 211
Particularités des orages de grêle..... 252
Particularités des orages volcaniques..... 139

	Pages
Perd-fluide	229
Phénomènes atmosphériques observés pendant les tremblements de terre	362
Phénomènes électriques des cyclones	332
Phénomènes électriques des orages	188
Phénomènes électriques des orages de grêle	256
Phénomènes électriques des tornades	320
Phénomènes électriques des trombes	299
Phénomènes électriques observés en temps serein	64
Phénomènes électriques des tremblements de terre	369
Phénomènes magnétiques observés pendant les tremblements de terre.	366
Photographies d'éclairs	147, 152, 155
Pointes des paratonnerres	218
Potentiel au centre des cyclones	333
Potentiel de l'électricité atmosphérique	55
Potentiel pendant les orages	185
Potentiel pendant les orages de grêle	256
Potentiel terrestre	350
Précautions à prendre contre la foudre	205
Présence de l'électricité dans l'atmosphère	1
Preuves à l'appui des théories électriques des tremblements de terre	379
Prix de revient des paratonnerres à pointes multiples	232

Q.

	Pages
Questionnaire pour l'étude des tremblements de terre	385

R.

	Pages
Raccordement des paratonnerres aux conduites d'eau et de gaz	228
Raccordement des conducteurs des paratonnerres aux pièces métalliques	224. 245
Ramifications de l'éclair.	154
Raz de marée après les cyclones	338
Raz de marée après les tremblements de terre.	356
Régions habituellement dévastées par les tremblements de terre	358
Reproduction en miniature de la foudre globulaire	172
Reproduction en miniature de la grêle	281
Reproduction en miniature des aurores polaires	409, 417, 419
Reproduction en miniature des cyclones	336

	Pages
Reproduction en miniature des feux St-Elme	192
Reproduction en miniature des fulgurites	199
Reproduction en miniature des éclairs	148, 153
Reproduction en miniature des gyrations des nébuleuses	82
Reproduction en miniature des taches solaires	84
Reproduction en miniature des trombes	309, 133
Rôle de la pluie dans les orages	128
Rôle de l'électricité dans les aurores polaires	421
Rôle de l'électricité dans les cyclones	337
Rôle de l'électricité dans les orages	122
Rôle de l'électricité dans les orages de grêle	283
Rôle de l'électricité dans les tornades	320, 326
Rôle de l'électricite dans les trombes	311, 316
Rôle de l'électricité dans les tremblements de terre	376
Roulements du tonnerre	195
Rubans métalliques pour paratonnerres	226

S.

	Pages
Segment obscur des aurores polaires	388
Séismographe (Le)	358
Séismoscope magnétique des Japonais	374
Signe de l'électricité atmosphérique	55
Signe de l'électricité terrestre	105, 113
Soins à donner aux foudroyés	206
Soleil et taches solaires.	83
Suspension des nuages dans l'atmosphère	75

T.

	Pages
Taches solaires	83
Taches solaires et aurores polaires	402
Taches solaires et cyclones	339
Taches solaires et électricité atmosphérique	91
Taches solaires et magnétisme terrestre	343
Taches solaires et orages	142
Taches solaires et tremblements de terre	346, 360
Teintes des aurores polaires	388, 391
Théories sur la formation des orages	120
Théories de la foudre globulaire	162
Théories de la grêle	264
Théories des aurores polaires	405
Théories des trombes	300
Théorie des tremblements de terre	358, 373
Tonnerre	194
Tornades	317
Tourbillons aériens	120, 272, 305

Pages

Tourbillons de poussières 324
Trains de chemin de fer et la foudre (Les)..... 205
Traces héliçoïdales des éclairs 150, 201
Trombes..... 291
Tremblements de terre.. 341
Tremblements de terre causés par une action directe de l'électricité terrestre..... 376

U. — V.

Variations de l'aiguille aimantée pendant les aurores polaires..... 399
Variations de l'aiguille aimantée pendant les tremblements de terre. 366
Variations annuelles de l'électricité atmosphérique 44
Variations de l'électricité atmosphérique..... 36
Variations de l'électricité atmosphérique suivant l'état du ciel..... 45
Variations quotidiennes de l'électricité atmosphérique..... 38
Variations des aurores polaires..... 398
Variations des cyclones. 335
Variations des orages... 154
Variations des orages de grêle..... 252
Variations du magnétisme terrestre.....342, 366, 399
Vérification des paratonnerres..... 239
Vitesse de gyration des cyclones..... 330
Vitesse de propagation du bruit des tremblements de terre..... 355
Vitesse de propagation du tonnerre 195
Vitesse de translation des tornades.....318, 324
Volcans et orages..... 39
Volcans et tremblements de terre.....341, 361

W. — X. — Y. — Z.

Zones dangereuse et maniable des cyclones.... 231
Zone de protection des paratonnerres..... 237

Imprimeries F. GUY, à Alençon et à Laigle. — Alençon.

FAC. N. FILOSOFIA - BIBLIOTECA