M. L. BLOCH

LE PRINCIPE DE LA RELATIVITÉ ET LA THÉORIE D'EINSTEIN

BIBLIOTHÈQUE DES ANNALES DES POSTES, TÉLÉGRAPHES ET TÉLÉPHONES

LE

PRINCIPE DE LA RELATIVITÉ

ET LA

THÉORIE D'EINSTEIN

PAR

M. Léon BLOCH,

DOCTEUR ÈS SCIENCES.

PARIS

GAUTHIER-VILLARS ET C^ie^, ÉDITEURS

LIBRAIRES DU BUREAU DES LONGITUDES, DE L'ÉCOLE POLYTECHNIQUE

Quai des Grands-Augustins, 55.

1922

LE

PRINCIPE DE LA RELATIVITÉ

ET LA

THÉORIE D'EINSTEIN

PARIS. — IMPRIMERIE GAUTHIER-VILLARS ET Cie,
Quai des Grands-Augustins, 55.
67322-22

LE

PRINCIPE DE LA RELATIVITÉ

ET LA

THÉORIE D'EINSTEIN

PAR

M. Léon BLOCH,
DOCTEUR ÈS SCIENCES.

PARIS
GAUTHIER-VILLARS ET C^ie, ÉDITEURS
LIBRAIRES DU BUREAU DES LONGITUDES, DE L'ÉCOLE POLYTECHNIQUE
Quai des Grands-Augustins, 55.

—

1922

LE

PRINCIPE DE LA RELATIVITÉ

ET LA

THÉORIE D'EINSTEIN

PREMIÈRE CONFÉRENCE

FAITE PAR

M. Léon BLOCH,

Docteur ès sciences,

à l'École supérieure des Postes et Télégraphes,

LE 19 NOVEMBRE 1921.

MESSIEURS,

Il n'est pas extrêmement facile d'exposer la théorie de la Relativité d'Einstein en une ou deux conférences. Cette doctrine nouvelle touche à la fois à la Physique, à la Mécanique, à l'Astronomie, à la Géométrie, et nous ne pouvons avoir ici d'autre prétention que d'en esquisser les idées les plus importantes. Je m'attacherai à vous dire des choses simples que vous connaissez probablement déjà et à faire ressortir autant que possible la suite des idées.

Il y a, semble-t-il, deux raisons qui ont jusqu'ici empêché la théorie d'Einstein de recevoir du public français l'accueil qu'elle méritait. Ces deux idées sont fausses à mon avis. D'une part, on croit que pour comprendre les idées d'Einstein il faut savoir manier les hautes mathématiques et que sa théorie est hérissée de développements formels. J'accorde que pour préciser cette théorie, pour la mettre sous une forme déductive, des éléments de mathématiques sont nécessaires. Mais, comme il arrive pour toutes les grandes découvertes, les idées d'Einstein, dans leur sens général, peuvent se contempler sans ce vêtement, qui parfois les orne et qui parfois les dissimule. Leur harmonie provient de leur simplicité, plus encore que de leur rigueur.

D'autre part, on se figure volontiers qu'Einstein est un constructeur d'hypothèses, qu'il a créé une théorie analogue aux autre théories, c'est-à-dire qu'il a montré la fausseté des hypothèses de ses prédécesseurs et qu'il leur a substitué une hypothèse meilleure, — la sienne. Ceci n'est pas exact. Un trait tout à fait caractéristique des théories d'Einstein — j'insiste beaucoup sur ce point parce qu'il est trop méconnu — est qu'Einstein suit d'aussi près que possible l'expérience. Loin d'être un faiseur d'hypothèses *a priori*, il ne considère comme accordé, comme certain, que ce qui repose sur des bases expérimentales. J'irai même jusqu'à dire qu'Einstein est plutôt un expérimentateur qu'un mathématicien. Au lieu de substituer aux hypothèses courantes une hypothèse nouvelle, il se contente de soulever un doute sur ce qui est obscur, il montre que les hypothèses le plus anciennement admises ne s'imposent pas toujours, qu'elles sont sujettes à revision et, si elles doivent tomber, il peut y avoir avantage à ne les remplacer par aucune autre. Une remarque critique peut parfois éclairer à elle seule les horizons de la Science, de même que lorsqu'on démolit des baraquements qui gênent la vue il n'est pas nécessaire d'y susbtituer des maisons neuves pour y voir clair.

Einstein est donc, malgré son caractère révolutionnaire, dans la véritable tradition des savants classiques, de ceux à qui nous devons les découvertes les plus fécondes, en ce sens qu'il a essayé, lui aussi, de démasquer une des illusions de l'esprit humain, sans pour cela vouloir y substituer une illusion nouvelle. Pour mieux me faire comprendre, je vais faire un rapide retour sur l'histoire générale des idées, que je résumerai en trois points fondamentaux, en commençant par la découverte déjà très vieille de la rotondité de la Terre.

Lorsqu'on pensait que la Terre était plate, on se fiait simplement aux sensations usuelles, on croyait que l'horizon plan auquel nous sommes habitués se prolonge indéfiniment. Les grands astronomes de l'antiquité, en particulier Ératosthène, ont démontré que la Terre était ronde; ils ont prouvé que la Terre n'était pas un plan indéfini, que c'était là une illusion humaine : la Terre n'est plane que lorsqu'on la considère sur une étendue limitée, sur une étendue de quelques dizaines de kilomètres. Ératosthène avait même donné comme mesure du rayon terrestre le nombre de 450 000 stades, assez voisin des 6400^{km} qui constituent la valeur admise aujourd'hui.

Une seconde illusion a été détruite au moment où Copernic a eu l'idée, qu'il a d'ailleurs eu peine à faire prévaloir, de la rotation de la Terre sur elle-même. Il a substitué un mouvement « relatif » de la Terre autour de son axe au mouvement « absolu » admis par les anciens, à la rotation de la sphère céleste autour de la Terre. Copernic a montré que l'idée que la Terre tourne autour de son axe conduit à des résultats astronomiques et géométriques aussi exacts que ceux de ses prédécesseurs et cela d'une façon bien plus simple. Bien entendu, pour se ranger à l'idée de Copernic, que nous partageons tous aujourd'hui, il faut admettre qu'un globe comme la Terre, une masse d'environ 6.10^{24} kg, puisse être mise en rotation autour de son axe.

La troisième grande découverte que je tiens à rappeler est celle de Képler, c'est celle du mouvement de révolution de la Terre autour du Soleil, découverte qui a été le point de départ de la théorie de Newton. Cette découverte ne pouvait être appréciée et reconnue exacte que si l'on admettait l'existence de vitesses et de distances auxquelles nous ne sommes pas accoutumés, et avec lesquelles l'esprit humain a peine à se familiariser. Il fallait admettre qu'une distance de $150\,000\,000^{km}$, — celle qui nous sépare du Soleil, — était aussi naturelle qu'une toise ou un mètre. Il fallait admettre qu'une vitesse comme la vitesse de la Terre sur son orbite, qui, vous le savez, est de 30^{km} par seconde en moyenne, vitesse énormément supérieure à celle de tous les projectiles humains, était néanmoins une vitesse réelle.

Je retiens de cette très rapide énumération que les trois étapes qui constituent les trois progrès essentiels de la Science astronomique ont été marquées par l'introduction de grandeurs dont chacune était d'un ordre tout à fait inusité : un rayon terrestre de 6400^{km}, une masse de la Terre de 6.10^{24} kg environ, une vitesse énorme de la planète sur une orbite d'un rayon énorme. Les progrès en Astronomie et dans la Science en général ont été réalisés en forçant l'esprit humain à renoncer à ses illusions, à reconnaître que les grandeurs auxquelles il était habitué ne sont pas les seules qui jouent un rôle dans la nature, à admettre qu'il existe des distanees très grandes et des vitesses très grandes.

Les idées d'Einstein se rattachent très étroitement à cette tradition. Lui aussi a eu comme principal objet de montrer que certaines notions qui nous sont familières soit depuis Newton, soit depuis Galilée, soit même depuis des milliers d'années, méritent d'être analysées et revisées.

Parallèlement à l'évolution que je viens de résumer, nous devons signaler une évolution dans l'emploi qu'ont fait les savants de ce qu'on appelle aujourd'hui *des systèmes de référence* ou *des systèmes d'axes de coordonnées*. On désigne sous ce nom les configurations fixes auxquelles on rapporte les objets que l'on étudie.

C'est une remarque souvent faite par les philosophes de l'antiquité que nous ne pouvons parler d'une chose, la préciser, sans la situer par rapport à un système de référence. Nous ne pouvons parler du lieu qu'occupe un corps sans rapporter ce lieu à trois axes de coordonnées que nous supposerons être par exemple les trois axes qui forment l'angle de cette salle. Lorsque vous dites que dans huit jours la même personne occupera la même place dans la même salle, cela veut dire que cette personne possédera les mêmes coordonnées par rapport aux trois axes de la salle, quoique la Terre se soit déplacée dans l'espace pendant ce temps, d'un grand nombre de milliers de kilomètres. Les axes qu'on a employés en premier lieu dans les calculs sont des axes semblables à ceux que je viens de vous donner en exemple et que j'appellerai des *axes liés à la Terre*, ou mieux à une localité particulière de la Terre. Si nous voulons faire de la science à Paris, nous emploierons des axes locaux dont l'origine sera à Paris, c'est-à-dire qui seront fixes par rapport au sol de Paris. C'est seulement en nous référant à de tels axes que nous pourrons dire qu'un corps est en mouvement ou en repos pour nous. Vous voyez donc que la conception de l'espace est une chose essentiellement relative : un corps qui est pour nous immobile dans l'espace peut être en mouvement pour d'autres observateurs.

Lorsqu'on a découvert la rotation de la Terre autour de son axe, il a été tout naturel d'employer comme système d'axes de référence des axes dont l'un coïncide avec l'axe de rotation de la Terre, ce que nous appelons *la ligne des pôles terrestres*. Les deux autres sont des axes rectangulaires pris dans le plan de l'Équateur, c'est-à-dire des axes encore liés à la Terre, mais ayant leur origine au centre et possédant la symétrie du mouvement de rotation de la Terre. L'avantage qu'il y a eu à choisir ces axes est que tous les phénomènes influencés par la symétrie du mouvement de rotation de la Terre prennent un aspect beaucoup plus simple lorsqu'on se sert de ces axes. Leur description est grandement facilitée. Parmi ces phénomènes le plus important est le mouvement diurne.

Mais ces axes ne se sont pas toujours montrés les plus simples. A partir du moment où des découvertes comme celles de Copernic, Képler, Newton, nous ont fait connaître la structure du système solaire et le mouvement de révolution de la Terre autour du Soleil, on a constaté que les faits astronomiques se présentaient sous un jour beaucoup plus simple en employant d'autres axes que l'on appelle *axes astronomiques*. Ce sont des axes qui ont leur centre au centre du système solaire et ce sont ceux dont se servent les astronomes aujourd'hui. Un des axes, l'axe des z par exemple, sera perpendiculaire au plan de l'écliptique, les deux autres seront dirigés dans ce plan, l'un d'entre eux rejoint la Terre à une position de l'équinoxe, par exemple celui de l'année 1850; voilà des axes liés au Soleil et pour lesquels les lois astronomiques prennent une forme beaucoup plus simple que lorsqu'on se sert des axes liés à la Terre, soit locaux, soit symétriques.

L'évolution n'est pas terminée, puisque nous savons aujourd'hui que le Soleil, pas plus qu'aucun autre corps dans la nature, n'est immobile, et d'ailleurs le mot « immobile » n'a pas de sens tant qu'on ne compare pas l'objet dit « au repos » avec d'autres objets. Nous savons aujourd'hui comparer la position du Soleil avec celle des constellations et reconnaître le « mouvement général du système solaire » vers un point déterminé de notre ciel. Le Soleil nous entraîne avec une grande vitesse vers la constellation d'Hercule. Le jour où ce mouvement sera important pour nos besoins pratiques, où nous connaîtrons beaucoup de choses qui en dépendent, on devra introduire un système d'axes liés au « ciel » et les astronomes ont déjà introduit ce système; c'est le système des axes dits « galactiques », c'est-à-dire reliés à la Voie lactée, celle-ci étant considérée comme plane et formant l'un des plans coordonnés.

Vous voyez qu'avec les progrès de la Science on a chaque fois changé le système d'axes sans qu'on puisse dire à aucun moment qu'un système d'axes soit vrai et les autres faux. Ils se distinguent seulement par leur facilité d'usage, par la simplification qu'ils apportent aux lois de l'Astronomie.

Parmi les axes que l'on peut employer pour étudier les phénomènes, Newton avait fait une distinction d'une grande importance et sur laquelle il nous faut insister un peu.

Partons d'un système d'axes tel que celui des axes astronomiques et que nous appelons *axes au repos* ou *axes absolus*. Si nous analysons dans ce système d'axes les mouvements des corps mécaniques, nous établirons certaines lois, par exemple celles de la chute des corps, l'attraction universelle. etc., et nous traduirons ces lois en formules mathématiques.

Supposons maintenant qu'au lieu d'un système de ce genre nous prenions un système animé d'une rotation par rapport aux axes absolus. C'est un fait banal, reconnu aujourd'hui par tout le monde et que Newton a précisé avec beaucoup de soin, que dans un système en rotation par rapport aux axes absolus, les lois de la Physique mathématique ne s'appliquent plus. La Cinématique ordinaire n'est plus vraie, les phénomènes mécaniques changent d'aspect, parce que le choix d'axes en rotation entraîne l'existence de ce que nous appelons la *force centrifuge*. Lorsqu'un point est immobile, au repos dans un système en rotation, il se trouve (même en l'absence de toute autre force) soumis à la force centrifuge. Newton a beaucoup insisté dans ses *Principes* sur ce fait que si les lois de la Mécanique sont vraies pour les axes absolus, elles ne le sont plus pour les axes en rotation.

Nous voici donc aux prises avec une alternative redoutable. Il faut ou bien que nous disions qu'il y a deux Mécaniques, une vraie pour les axes absolus (la Mécanique newtonienne) et une autre vraie pour les axes en rotation, ou bien on devra dire que les forces centrifuges n'existent pas, qu'elles sont fictives, tandis que les forces ordinaires sont des forces réelles. Cette manière de parler a été très longtemps en usage, je crois même qu'elle est encore employée aujourd'hui, mais elle n'est pas très satisfaisante car les différences entre les forces fictives et les forces réelles ne se traduisent par rien. Ces forces fictives sont capables de briser le volant d'une dynamo qui marche trop vite. La force centrifuge peut également gonfler la Terre en lui donnant son bourrelet équatorial. Il semble préférable de conserver l'unité de la Mécanique. Il nous faudra trouver pour cela une Mécanique qui comprenne comme cas particuliers à la fois la Mécanique des axes absolus et celle des axes en rotation. C'est là un des points sur lesquels Einstein a porté ses efforts avec le plus de succès. Au lieu de résoudre la difficulté qui nous embarrasse par la distinction entre « forces réelles » et « forces fictives », il a pensé qu'il existait une Mécanique dont les lois newtoniennes ne sont que l'expression approximative et dont les lois exactes comprendraient, comme cas particuliers, à la fois les lois de

Newton et les lois relatives au mouvement doué de force centrifuge.

Je laisse de côté un instant la solution proposée par Einstein pour revenir à celle qui avait été adoptée par Newton, et qui a été suivie par tout le monde jusqu'à présent. C'est la solution qui consiste à faire intervenir la mécanique newtonienne dans les problèmes où l'on se réfère aux axes absolus et, lorsqu'il s'agit de systèmes en rotation, à introduire les forces centrifuges comme éléments de calcul.

Pour faire sa Mécanique, Newton était obligé au point de départ — et il le dit expressément — d'admettre qu'il existe des axes absolus. Mais alors, il se présente tout de suite une difficulté, c'est que s'il existe des axes absolus, il en existe une infinité. Nous ne pouvons pas éviter cette indétermination.

Il y a deux raisons pour lesquelles, s'il existe un système d'axes absolus, il en existe une infinité :

1° Supposons que nous ayons choisi comme axes absolus un système de trois axes rectangulaires, par exemple les axes astronomiques dont je parlais tout à l'heure. Rien ne nous empêche de substituer à ces trois axes, trois autres axes trirectangulaires au repos par rapport aux précédents, dont l'origine se trouve n'importe où par rapport à l'origine primitive et dont l'orientation est arbitraire. Nous pouvons déplacer notre trièdre fondamental d'un point à un autre et lui imprimer une rotation quelconque, obtenant ainsi un système d'axes au repos parfaitement utilisables et pour lesquels les lois de la Mécanique ne changent pas. Ceci est un résultat expérimental. Quel est le fait d'expérience qui le démontre ? C'est celui-ci : je puis déplacer dans l'espace un corps solide sans le modifier. Je peux transporter une figure dans l'espace d'un point à un autre d'un mouvement d'ensemble sans rencontrer de résistance. Nous savons tous cela, c'est l'évidence même, et c'est cependant une propriété purement expérimentale de l'espace. Ce n'est pas là une propriété nécessaire, car il y a des espaces qui ne la possèdent pas. Il y en a un que je peux vous signaler, c'est le paraboloïde de révolution. Si nous disposons d'un paraboloïde de révolution et si sur ce paraboloïde nous voulons placer une circonférence de cercle, nous l'entrerons par le sommet et la fixerons à l'endroit où la section du paraboloïde coïncide avec la circonférence du cercle. Une fois là, nous ne pourrons plus la mouvoir, elle demeurera coïncée. L'espace euclidien a cette supériorité sur le paraboloïde, c'est qu'une fois qu'on y a placé une figure, on peut la mouvoir tout en la laissant identique à elle-même. Les figures restant les mêmes lorsque je les déplace par rapport au trièdre de référence, je peux aussi faire l'opération inverse : faire tourner le trièdre et le déplacer, en laissant les figures immobiles, c'est évidemment la même chose. Voilà pourquoi je dis que c'est un fait expérimental, la possibilité du déplacement, qui justifie l'existence d'une infinité d'axes, tous « absolus » également. Ces axes se déduisent les uns des autres par des translations et des rotations. Toutes ces transformations réunies forment un système de transformations tel que lorsqu'on en fait d'abord une, puis une autre, on obtient encore une transformation du même ensemble. C'est ce que les mathématiciens appellent un *groupe de transformations*. Le groupe très simple auquel nous avons affaire ici est le groupe des déplacements dans l'espace; je l'appellerai le *groupe euclidien*, parce qu'il est caractéristique, ainsi que je viens de le rappeler, de notre espace ordinaire ou espace euclidien.

2° Mais il y a encore une autre raison qui fait que nous pouvons disposer d'une infinité d'axes absolus, et elle est encore d'ordre expérimental. Cette raison a été signalée par Galilée. Galilée a observé un fait général qu'il a qualifié du nom de *principe d'inertie*. Il a observé qu'un point libre dans un système d'axes absolus était *immobile* ou se mouvait *uniformément* et il a observé que dans un autre système animé d'un mouvement de translation par rapport au premier, le principe d'inertie est encore vrai, le corps décrit encore une ligne droite. Que résulte-t-il de là? C'est que si, dans un premier système, j'ai un point dont l'accélération est nulle :

$$\frac{d^2 x'}{dt^2} = 0;$$

aos do

dans un second système dont les axes sont parallèles au premier et qui est animé d'un mouvement de translation par rapport à celui-ci, j'aurai encore

$$\frac{d^2 x}{dt^2} = 0.$$

La relation qui s'ensuit entre x' et x est

$$x' = x + vt$$

et une relation du même genre subsisterait si la translation se faisait dans une direction quelconque. Si dans cette formule on donne à v toutes les valeurs possibles, on obtient l'ensemble de toutes les translations dans tous les sens et de toutes les amplitudes : cet ensemble constitue ce que j'appelle le *groupe galiléen*, le groupe des transformations qu'on obtient en passant d'un système d'axes au repos à un système d'axes animés d'un mouvement de translation uniforme par rapport aux premiers. Faites un petit effort de généralisation pour réunir en un seul système le groupe euclidien et le groupe galiléen et vous obtenez le groupe le plus général donnant tous les systèmes d'axes tels que la mécanique newtonienne reste valable dans chacun d'eux, c'est le groupe newtonien. Dans cette infinité de systèmes d'axes la cinématique newtonienne restera vraie. J'en rappelle les formules fondamentales :

$$x' = x + vt,$$
$$\frac{dx'}{dt} = \frac{dx}{dt} + v,$$
$$\frac{d^2 x'}{dt^2} = \frac{d^2 x}{dt^2}.$$

Nous ne pouvons naturellement distinguer entre tous ces axes, qui sont équivalents pour nous. Des formules qui viennent d'être écrites, tirons la remarque suivante, c'est que l'expression $\frac{dx}{dt}$, la vitesse, n'a pas de sens absolu en Physique, parce qu'elle n'est pas la même dans les deux systèmes d'axes Ox et $O'x'$. Elle peut être nulle dans un système et différente de zéro dans l'autre. Au contraire, la grandeur $\frac{d^2x}{dt^2}$, l'accélération, a un sens parce que son expression analytique est *invariante*. Si nous partons de ce fait que la grandeur $\frac{d^2x}{dt^2}$ est la même dans tous les systèmes utilisables (galiléens ou newtoniens), qu'elle est douée de sens physique, et si nous ajoutons la remarque qu'à un point matériel nous pouvons attacher un nombre, sa masse m, qui ne dépend pas des systèmes de coordonnées et qui a un sens immédiat; nous pouvons en conclure que la grandeur

$$m\frac{d^2x}{dt^2} = X$$

est aussi une chose qui ne dépend pas du choix des axes. Nous avons alors le droit de lui donner un nom, c'est ce qu'on appelle la *force*. C'est à cause de son caractère invariant que la force joue un si grand rôle dans la mécanique newtonienne, dont je viens d'écrire ici l'équation fondamentale.

La mécanique newtonienne qui est vraie pour tous les axes absolus suffit largement dans la pratique; c'est la mécanique dite *rationnelle*, celle dont nous nous servons ordinairement, excellente approximation de la réalité. Jusqu'à Einstein, on ne s'était guère aperçu qu'il fallût la modifier, et on l'utilisera d'ailleurs bien longtemps encore. Toutefois nous sommes mis en garde, comme je l'ai dit au début, contre l'idée de mépriser les ordres de grandeur qui ne sont pas en rapport avec les ordres de grandeur *humains*, ceux de la pratique journalière. Nous devons admettre qu'il existe des vitesses beaucoup plus grandes même que la vitesse du mouvement de la Terre sur son orbite. Parmi ces vitesses, la plus importante est la vitesse V, vitesse de la lumière, la même que celle de l'électricité, qui, en unités C.G.S., est 3×10^{10} cm par seconde.

Les vitesses ordinaires, quelques mètres ou même quelques centaines de mètres par seconde, vitesses que je désignerai par v, sont généralement extrêmement petites par rapport à la vitesse de la lumière. Le rapport $\frac{v}{V}$ atteint la plus grande valeur que nous lui connaissions si nous donnons à v la valeur correspondant au mouvement d'entraînement de la Terre sur son orbite, mouvement que je signalais tout à l'heure et qui est de 30^{km} par seconde. En ce cas — le plus favorable — le rapport $\frac{v}{V}$ est le rapport de 30^{km} par seconde à $300\,000^{\text{km}}$ par seconde, c'est encore $\frac{1}{10\,000}$.

La mécanique de Newton reste-t-elle vraie lorsqu'on fait des observations précises au $\frac{1}{10\,000}$ près? Oui. Aucune expérience n'a démontré l'insuffisance de la mécanique newtonienne tant que l'on s'en tient au premier ordre, aux grandeurs qui sont de l'ordre de $\frac{v}{V}$: par exemple l'aberration des étoiles, phénomène qui dépend du rapport entre la vitesse de la Terre et la vitesse de la lumière, s'explique très bien par l'optique et l'astronomie classiques. Il en est de même de l'électromagnétisme pur, qui demande déjà des expériences un peu plus raffinées, comme celles qui ont été faites il y a quelques années par M. Sagnac. L'expérience de M. Sagnac dépend aussi de $\frac{v}{V}$ et est du premier ordre. Sagnac a installé son expérience (c'était une expérience d'optique) sur un disque tournant comme la Terre et il a démontré par la photographie que les franges d'interférence subissent un petit déplacement lorsqu'on met cette terre fictive en rotation. Cette expérience donne le résultat que prévoyait la théorie classique au premier ordre près en $\frac{v}{V}$. Il n'y a aucune peine à l'expliquer par la Mécanique ordinaire et le résultat auquel est arrivé Sagnac est aussi tout à fait conforme aux lois de l'Électromagnétisme.

Les choses sont tout autres si l'on veut pousser la précision beaucoup plus loin, si l'on veut arriver à mesurer des grandeurs de l'ordre de $\frac{v^2}{V^2}$, c'est-à-dire du carré de l'aberration, ou de l'ordre de 10^{-8} dans le cas du mouvement de la Terre. Ici nous commençons à aborder des expériences vraiment délicates. La plus célèbre est celle du professeur Michelson, c'est encore une expérience d'optique. Michelson espérait lui aussi trouver un déplacement de franges à cause du mouvement de translation de la Terre. L'expérience de Sagnac étant une expérience du premier ordre, Sagnac a pu se contenter d'un petit disque, mais celle de Michelson étant beaucoup plus fine, il a fallu prendre comme disque l'orbite terrestre.

En gros, l'expérience de Michelson est celle-ci. Un nageur veut traverser une rivière perpendiculairement; il est entraîné par le courant à l'aller et au retour. S'il veut arriver au rivage en face du point de départ, il doit nager obliquement. Un autre nageur veut remonter le courant à une même distance; il aura de la peine à le remonter, tandis qu'il aura de la facilité à le redescendre. Des deux nageurs, qui arrive le plus vite? Celui qui fait l'aller et le retour transversalement ou celui qui remonte à la même distance et redescend aidé par le courant? Michelson montre qu'il y a une différence dans les temps employés par ces deux nageurs. Dans son expérience, le nageur est remplacé par une onde lumineuse qui va rencontrer des miroirs placés transversalement ou obliquement, et l'on mesure la différence des temps employés dans les deux cas. La théorie électromagnétique classique et la mécanique de Newton annoncent qu'il doit y avoir en effet une certaine différence mesurable (du second ordre) : l'*expérience de Michelson a donné zéro*. Michelson et Morley ont refait l'expérience avec une précision du centième et ont encore trouvé zéro. C'était très imprévu et fort grave, car c'était la première atteinte portée *par voie expérimentale* à la mécanique de Newton et à l'électromagnétisme qui en dépend. Aussi les physiciens se sont-ils donné beaucoup de mal pour éviter d'abandonner la mécanique de Newton qui leur avait rendu tant de services. Ils sont allés jusqu'à imaginer des hypothèses qui semblent au premier abord surprenantes. Telle est l'hypothèse de Fitz-

Gerald et Lorentz qui consiste à dire qu'il faut admettre, pour expliquer l'absence des effets prévus, que l'appareil, sans que nous sachions pourquoi, s'est contracté dans le sens du mouvement de la Terre et non dans l'autre sens, comme si la rivière s'était raccourcie dans le sens du courant et non dans le sens de la largeur. C'est une hypothèse qui n'a rien de très naturel, mais qui explique très bien les choses, car elle est calculée précisément pour donner la compensation voulue. On n'a d'ailleurs pas trouvé mieux que l'hypothèse de Fitz-Gerald et Lorentz pendant très longtemps. Il était pourtant choquant, même pour les auteurs de l'hypothèse, de dire qu'il y a dans nos appareils une espèce de mécanisme automatique qui nous empêche de trouver les résultats annoncés par la Physique : ces résultats s'organiseraient entre eux de telle façon qu'ils nous demeurent toujours cachés. Aussi fût-ce une chose extrêmement importante lorsqu'Einstein suggéra une interprétation tout à fait nouvelle du résultat négatif obtenu par Michelson. C'est cette interprétation de l'expérience de Michelson qui est le point de départ de toute la théorie de la relativité. L'absence des effets prévus par la théorie dans l'expérience de Michelson montrait très clairement que les axes absolus de la mécanique newtonienne sont inaccessibles pour nous. Einstein en a tiré tout de suite la conclusion logique : *ces axes absolus n'existent pas.* L'espace absolu, ou, comme disent les physiciens, l'éther au repos n'existe pas, car s'il n'a d'autre fonction que de se cacher à nous, c'est une supposition gratuite d'affirmer son existence.

Donc cet espace, ces axes absolus qu'on avait admis jusque-là sont des illusions. Si Einstein n'avait dit que cela, il n'aurait pas fait beaucoup plus que Lorentz, qui a tiré de l'expérience de Michelson la même conséquence. La partie vraiment hardie de l'œuvre d'Einstein est d'avoir étendu la théorie de la non-existence de l'espace absolu à la *non-existence du temps absolu.* C'est là à mon sens ce qu'il y a de plus original et de plus important dans les découvertes d'Einstein. Einstein a fait la remarque très simple que tous les calculs qui avaient laissé prévoir un effet positif (du second ordre) étaient basés sur cette idée accréditée que le temps est le même pour un observateur au repos et pour un observateur en mouvement. Cela a l'air bien naturel, mais il faut se méfier de ce qui a l'air naturel et Einstein a osé émettre un doute. Il a dit : D'où savons-nous qu'un observateur au repos et un observateur en mouvement se servent *du même* temps ? Quand on se pose cette question, on est tout de suite amené à constater que nous n'avons aucune raison *a priori* d'admettre une telle identité. La preuve que cette identité n'est qu'une hypothèse, c'est que Newton a dû la poser en « axiome » au début de ses *Principes Mathématiques*. Rien n'oblige à croire que le temps reste le même pour un observateur au repos et pour un observateur en mouvement. Newton l'avait pressenti, mais il a déclaré : J'admets cet axiome pour que la mécanique soit possible. Einstein a révoqué en doute la nécessité de l'axiome de Newton. Comme tout ce qu'a fait Einstein, il l'a fait pour des raisons expérimentales. Il s'est demandé si ce temps *a priori*, le temps absolu de Newton, ce temps auquel nous sommes habitués, dans lequel nous vivons et que nous prolongeons à l'infini, est uniformément et indéfiniment le même. Autrefois la Terre passait pour plate parce qu'elle est plate dans notre voisinage; l'uniformité absolue du temps ne serait-elle pas une illusion du même genre ?

Laissons de côté toute idée qui n'est qu'une hypothèse et voyons ce que l'expérience nous apprend. Qu'est-ce que le temps pour un système d'observateurs liés à des axes que nous pouvons appeler axes au repos ? C'est l'indication de nos horloges. Comment sont-elles réglées ? Il n'y a, si l'on veut s'en tenir à l'expérience, qu'une seule manière de régler des horloges, c'est par des signaux optiques ou électromagnétiques. En fait, comment fait-on pour synchroniser les horloges usuelles? On se sert des ondes de T.S.F. Nous possédons ce moyen et nous n'en possédons pas d'autre.

Qu'appelons-nous le temps à la surface de la Terre ? Prenons une horloge qui donne le temps astronomique, — la pendule mère de l'Observatoire de Paris, — et transmettons par T.S.F. ce temps en des lieux éloignés. En quoi consiste cette transmission? Elle consiste à noter aux deux stations pour lesquelles nous voulons synchroniser les horloges, stations que nous appellerons A et B, l'heure correspondant au passage d'un même signal lumineux (ou hertzien). Ainsi nous noterons en A (à Paris) le temps t_A marqué par l'horloge au départ d'un signal lumineux qui arrive en B à l'instant t_B, puis revient, réfléchi sur un miroir, à l'instant t'_A au point de départ. Le temps de B moins le temps de A

$$t_B - t_A = \frac{l}{V}$$

est le temps mis par la lumière pour parcourir la distance l avec sa vitesse propre V.

Il en est de même du temps $t'_A - t_B$. Même si nous ne connaissions pas la vitesse V de la lumière, nous pourrions toujours déduire le temps de B en remarquant qu'il est la moyenne arithmétique entre t_A et t'_A :

$$t_B = \frac{t_A + t'_A}{2};$$

c'est ce temps que nous ferons marquer à l'horloge de B. A ce moment-là elle indiquera le même temps que l'horloge qui a expédié le signal, il y aura synchronisme entre A et B. Propageons ce réglage de proche en proche et nous arriverons à avoir tout autour de la Terre des horloges synchrones, à avoir partout le même temps.

Supposons que nous ayons ainsi synchronisé des horloges ou des chronomètres; que nous ayons par exemple deux chronomètres de bord synchronisés par cette méthode et que nous les mettions sur un navire en marche, l'un à l'avant, l'autre à l'arrière, dans le sens du mouvement du bateau. Ces deux chronomètres sont des garde-temps, qu'on emporte avec soi pour avoir le temps continental, le temps général. Je dis que sur le navire ces deux chronomètres ne seront plus d'accord. En effet, si je répète en marche la même expérience de synchronisation, le signal qui ira de A en B mettra un temps plus long pour arriver en B; B marquera à ce moment le temps θ_B, tel que

$$\theta_B - t_A = \frac{1}{V - v},$$

puisque le navire a une vitesse v dans le sens de la propagation. Au retour nous aurons par contre

$$t'_A - \theta_B = \frac{1}{V + v},$$

de sorte que le temps θ_B ne sera plus du tout la moyenne arithmétique entre t_A et t'_A, il sera tout autre chose, et d'après nos conventions les deux horloges ne seront plus synchrones.

Donc, lorsque dans un système nous avons des horloges synchronisées, donnant *le même* temps, dans un autre système, en mouvement par rapport à celui-ci, les mêmes horloges ne sont plus synchrones; elles ne marquent plus *le même* temps. Deux événements qui seront simultanés dans le premier système *ne seront plus simultanés dans le second.*

C'est là l'idée un peu difficile à saisir, un peu étrange au premier abord, qu'il faut admettre si l'on veut suivre Einstein. C'est l'idée de la *relativité de la simultanéité :* deux événements peuvent se passer en même temps dans un système et pas en même temps dans un autre. Nous sommes déjà habitués à penser que deux objets peuvent être au même point de l'espace dans un certain système et en des points différents dans un autre. Si deux objets sont vus par un observateur qui les regarde suivant la ligne qui les joint, ils se projetteront ensemble sur un plan et ne formeront plus qu'un seul point. Selon l'angle de perspective dans l'espace deux objets occuperont le même lieu ou des lieux différents. Einstein prétend qu'une propriété semblable existe aussi pour le temps. Deux événements qui se passent au même moment dans un système se passent nécessairement à des moments différents dans un second système en translation par rapport au premier, si les horloges sont synchronisées dans les deux systèmes par la seule méthode qui soit à notre disposition, la méthode expérimentale.

En introduisant cette notion, Einstein a donc porté un coup non seulement aux axes absolus de Newton et de Galilée mais également au temps absolu. Il a montré que nous ne devions plus parler d'un temps qui serait le même par définition pour un observateur au repos et pour un observateur en mouvement. Une telle hypothèse est arbitraire et n'a pas de sens au point de vue expérimental.

Cette simple remarque permet d'expliquer d'une manière immédiate l'expérience de Michelson, tout en respectant le principe de la constance de la vitesse de la lumière. Il n'y a plus besoin de faire appel à une contraction qui se produirait instantanément, et qui serait justement faite pour annihiler un effet qui nous gêne sans que nous comprenions pourquoi. Il suffit de se dire que les observations faites sur les nageurs, ou sur les ondes lumineuses mobiles, n'ont de sens que si elles sont faites dans un espace défini et dans un temps défini, autres pour l'observateur mobile et pour l'observateur au repos.

Relativité du temps, possibilité d'événements simultanés pour certains observateurs, non simultanés pour d'autres, telle est la notion essentielle qu'Einstein a introduite. On dira peut-être que l'expérience de Michelson, malgré sa finesse et le soin avec lequel elle a été faite, n'était pas suffisante pour justifier un bouleversement aussi complet des idées classiques. On doit répondre hardiment que si. D'ailleurs, il y a d'autres expériences, un peu moins célèbres, qui ont conduit toutes à la même conclusion (Rayleigh et Brace, Trouton et Noble, etc.). Toutes ont donné un résultat négatif là où l'on s'attendait à un résultat positif. L'interprétation d'Einstein est donc établie sur une base expérimentale assez solide pour que nous puissions, par une généralisation un peu hardie, dire que le résultat demeurerait négatif *pour toute expérience*. J'avoue que cette affirmation était d'abord un peu osée, mais tout jusqu'ici est venu consolider la position si nettement prise par Einstein. Einstein dit : Ce qu'a démontré l'expérience de Michelson en Optique, l'expérience de Trouton et Noble en Électricité, restera vrai dans n'importe quel domaine de la Physique ou de la Mécanique. Si nous analysons les phénomènes au second ordre près, la mécanique newtonienne se trouvera atteinte partout de la même manière. Nous arriverons aussi à rétablir l'accord de la même manière, en disant qu'il n'existe pas de temps absolu, que l'erreur provient de notre imagination, de l'hypothèse implicite que nous faisions, à savoir que le temps dans l'espace mobile est le même que dans l'espace immobile. C'est cette façon de voir que l'on énonce parfois sous le nom de *Principe de relativité restreinte*. Bien qu'il repose à vrai dire sur un assez petit nombre d'expériences, le principe de relativité restreinte n'en est pas moins un principe expérimental, non un énoncé *a priori*. C'est à proprement parler l'interprétation des idées d'Einstein sur le temps et l'espace, c'est-à-dire en fin de compte le corollaire nécessaire des recherches expérimentales de Michelson et Morley. Vous voyez quelle est l'importance considérable de ces recherches et comment elles ont amené automatiquement à admettre que si l'on arrive à mesurer des fractions de grandeurs extrêmement petites, de l'ordre de 10^{-8} par exemple, la mécanique newtonienne n'est plus rigoureusement vraie. Je dirai la prochaine fois par quel système plus général nous devons la remplacer.

DEUXIÈME CONFÉRENCE

FAITE PAR

M. Léon BLOCH,

Docteur ès sciences,

à l'École supérieure des Postes et Télégraphes,

LE 26 NOVEMBRE 1921.

MESSIEURS,

A la fin de notre première conférence, nous avons énoncé le principe de relativité restreinte sous la forme suivante. Il est impossible, par quelque expérience que ce soit, optique, électromagnétique, ou de toute autre nature, de reconnaître un mouvement de translation absolu. Cet énoncé est celui d'un principe expérimental, puisqu'il résume le résultat des expériences de Michelson et de quelques autres en les dépassant un petit peu. Il équivaut à dire que les axes absolus de Newton, l'éther absolu des physiciens, ne peuvent pas être mis en évidence d'une manière expérimentale. S'ils existaient, ce ne serait que pour se cacher à nous, donc ils n'existent pas. Le principe de relativité restreinte exprime que l'un des axiomes de la mécanique newtonienne, l'axiome d'existence des axes absolus, ne peut être maintenu.

De même, et pour des raisons également expérimentales, nous devons rejeter l'existence d'un temps absolu. C'est un second axiome de la mécanique newtonienne auquel il faut renoncer. Si l'on définit le temps, comme nous l'avons fait, par une synchronisation d'horloges à l'aide de signaux, nous arrivons à cette conclusion que deux événements peuvent être simultanés dans un système et non simultanés dans un autre. Il n'y a donc pas moyen de parler d'un temps qui serait le même partout. La simultanéité est une chose relative.

Que faut-il mettre à la place de cet espace absolu, de ce temps absolu newtoniens que l'expérience montre ne pas pouvoir subsister tels quels? Il faut adopter une conception extrêmement simple, qui se déduit de nos expériences les plus courantes, une remarque d'une banalité extrême, mais dont la fécondité n'a été mise à profit qu'il y a fort peu de temps et en particulier par le mathématicien Minkowski.

Minkowski a poussé jusqu'au bout les conséquences de cette idée qu'on ne peut pas définir la mesure d'une longueur autrement qu'en un instant donné du temps et qu'on ne peut pas non plus mesurer un laps de temps autrement qu'en un point donné de l'espace. Il en a conclu qu'espace et temps sont deux choses si étroitement mélangées, si naturellement unies, qu'il est tout à fait impossible de les séparer. Il a proposé de dire que puisque l'espace absolu n'existe pas et que le temps absolu n'existe pas davantage, la réalité véritable c'est le mélange des deux, c'est l'espace-temps, ou, comme il l'a appelé, *l'univers*. Faute d'un meilleur mot, nous adopterons cette dénomination. C'est une notion fort importante, avec laquelle il faut se familiariser, que nous vivons non pas comme nous le pensons dans une multiplicité à trois dimensions, l'espace, à laquelle on a ajouté des horloges pour mesurer le temps, mais dans une multiplicité à quatre dimensions, l'espace-temps ou univers.

Qu'est-ce que cela veut dire? Nous pouvons l'inférer d'une analogie. Envisageons l'espace ordinaire à trois dimensions et dans cet espace imaginons des êtres qui, eux, n'auraient que deux dimensions, par exemple des insectes dont la vie se passerait dans un plan horizontal et qui ignoreraient la troisième dimension. Ces insectes n'auraient pas les mêmes lois scientifiques que nous. Par exemple s'ils étudiaient les brins d'herbe qui les entourent, ces brins d'herbe leur apparaîtraient sous la forme d'ombres projetées sur le sol; en suivant leur développement, leur croissance, ils constateront que chaque brin d'herbe pousse en tournant, parce que le Soleil se déplace et que l'ombre tourne. Ils créeront une botanique spéciale, qui aura pour eux une certaine valeur, mais n'en aura pas du tout pour nous. Nous jugerons qu'ils ont pris la projection de la réalité sur un plan à deux dimensions pour la réalité elle-même. Leur science n'aurait d'utilité pratique que si le plan de projection était à peu près invariable, c'est-à-dire, si pendant toute la durée de la vie de l'insecte, le Soleil ne se mouvait qu'insensiblement sur l'horizon, de façon que les ombres restent relativement fixes : alors, dans une certaine mesure, la botanique des ombres pourrait suppléer à la botanique réelle.

L'idée de Minkowski est que nous ne sommes pas dans une position bien meilleure que celle des insectes. Nous vivons dans un espace à trois dimensions dont nous avons fait la science avec beaucoup d'effort, et cette science est non pas l'image de la réalité, mais une perspective très particulière. La valeur pratique de cette perspective tient au fait que les divers plans de projection utilisables (espaces euclidiens à trois dimensions) sont très peu inclinés les uns sur les autres, et cela, comme nous le verrons dans un instant, à cause de la valeur énorme de la vitesse de la lumière. Nous n'étudions malgré tout que des projections dans l'espace à trois dimensions de choses qui sont situées véritablement dans l'espace-temps ou univers. C'est là une notion à laquelle on ne s'accoutume pas tout de suite, mais avec un peu de réflexion on ne la trouve pas moins rationnelle que celle que nous avions jusqu'ici. De toutes façons, nous devons aller jusqu'au bout des conséquences.

Si, dans notre espace-temps, nous voulons décrire des choses réelles, nous devons les définir non pas par leur position dans l'espace à trois dimensions, mais par leur position dans l'espace, plus leur position dans le temps ; en particulier, si nous voulons parler de la distance de deux objets, nous ne devrons pas employer le mot de « distance » dans le sens ordinaire, nous ne devrons pas définir la distance de deux points très rapprochés par l'expression

$$ds^2 = dx^2 + dy^2 + dz^2,$$

mais par la formule

$$ds^2 = V^2\, dt^2 - \overbrace{(dx^2 + dy^2 + dz^2)}^{3\ \text{dimensions}},$$

où V désigne toujours la vitesse de la lumière.

En d'autres termes, la notion nouvelle qui doit remplacer celle de distance, et pour laquelle je suis obligé d'employer un mot nouveau — j'emploierai le mot d'«intervalle», — est une notion qui contient aussi le temps. J'écrirai, en faisant égale à 1 la vitesse de la lumière pour n'avoir pas à traîner avec moi le facteur V^2,

$$ds^2 = dt^2 - (dx^2 + dy^2 + dz^2),$$

et alors j'aurai une expression qui, elle, représente une véritable distance, non plus une projection, un véritable intervalle, non plus une composante d'intervalle.

Voilà la notion essentielle introduite par Minkowski. Nous pouvons projeter l'intervalle dans un grand nombre d'espaces et sur un grand nombre de temps, de même que dans la géométrie à trois dimensions nous pouvons projeter les distances sur beaucoup de plans et beaucoup d'axes. Si nous avons choisi un système d'axes de coordonnées à la manière newtonienne, c'est-à-dire trois axes absolus, ou axes astronomiques Ox, Oy, Oz, et le temps absolu astronomique porté sur l'axe Ot, c'est là un choix particulier d'axes de coordonnées dans lequel l'intervalle de deux événements très rapprochés aura la valeur

$$dt^2 - (dx^2 + dy^2 + dz^2).$$

Mais cet intervalle, étant une chose concrète, doit avoir la même valeur pour un autre observateur qui choisirait un autre système dans le nombre infini d'axes absolus permis par la dynamique newtonienne, et une autre mesure du temps. L'intervalle reste invariant, seules les façons de le mesurer sont variables. Pour certains des observateurs, l'intervalle projeté apparaîtrait tout entier dans l'espace; pour d'autres, il apparaîtra sous une forme mixte, projeté à la fois sur l'espace et sur le temps. De quoi dépendent ces variations d'aspect?

Du choix entièrement arbitraire des axes de coordonnées. Si je prends comme axes de coordonnées des axes dont l'origine est, d'après ma convention, fixe par rapport au milieu qui l'entoure, s'il y a *repos relatif* de l'origine des coordonnées et du milieu ambiant, je considérerai que les objets qui m'avoisinent et qui sont au repos par rapport à moi possèdent chacun quatre coordonnées que je puis appeler x, y, z, t. Si, au contraire, je fais la convention de considérer les objets voisins de l'origine comme animés d'une certaine vitesse par rapport à cette origine, cela m'amènera à employer un nouveau système de coordonnées dans lequel x, y, z seront remplacés par x', y', z' et dans lequel pareillement le temps t sera remplacé par t'. L'expression $dt^2 - (dx^2 + dy^2 + dz^2)$ est remplacée alors par $dt'^2 - (dx'^2 + dy'^2 + dz'^2)$, cette somme de carrés étant, par définition, égale à la précédente, puisque l'intervalle ds est une chose qui ne dépend pas du choix des coordonnées.

Le changement de point de vue dont nous venons de parler, le passage d'un système d'axes dans l'espace et dans le temps à un autre système, se réalise physiquement par un mouvement particulier, par la translation uniforme imprimée au système; une translation uniforme est précisément l'opération qui fait passer d'un groupe d'axes x, y, z, t, de la mécanique newtonienne à un autre groupe x', y', z', t' également justifié. Alors nous comprenons beaucoup mieux que précédemment le résultat des expériences de Michelson et l'interprétation qu'en avait donnée Lorentz. Pour l'observateur qui est lié au système, qui se croit en repos par rapport à lui, le temps et les longueurs sont mesurés avec un certain choix d'étalons. Pour l'observateur qui convient qu'il est immobile et que le système se meut, les mêmes réalités sont mesurées avec un autre groupe de grandeurs, il faut utiliser un autre étalon de temps et un autre étalon de longueur. Le premier observateur trouve qu'avec ses unités à lui, les seules qui soient à sa disposition, le corps en mouvement s'est contracté, mais l'observateur dans le corps en mouvement qui se croit, lui, au repos, trouvera que le système soi-disant fixe s'est contracté aussi; la contraction est mutuelle, et il sera impossible de décider lequel des deux observateurs a raison. Chacun d'eux se sert d'un étalon qui lui est particulier et s'ils font leurs mesures avec soin ils auront raison tous les deux. Au lieu de cette contraction mystérieuse qui avait quelque chose de choquant parce qu'elle était unilatérale, nous arrivons à poser une contraction mutuelle et purement apparente : elle tient uniquement à ce que les deux groupes d'observateurs au repos et en mouvement se servent d'un espace et d'un temps différents.

On peut développer considérablement les idées de Minkowski, donner beaucoup d'exemples dans divers domaines et pousser les conséquences très loin. Nous n'avons pas le temps de le faire ici, ce serait pourtant la seule manière de se familiariser avec ces notions, dont la logique interne est irréprochable et qui paraissent plus accessibles lorsqu'on les examine sous des aspects différents. J'indiquerai seulement quelques-unes des façons dont Minkowski a présenté son idée et qu'il a développées avec succès.

Les axes de la mécanique newtonienne, qui étaient en nombre infini, se déduisaient les uns des autres, nous l'avons dit, par des rotations dans l'espace euclidien. Le passage d'un système d'axes à un autre était simplement assujetti à la condition de laisser invariable ce que nous appelions dans l'espace newtonien la *distance*, c'est-à-dire l'expression

$$ds^2 = dx^2 + dy^2 + dz^2.$$

Il est tout à fait naturel de dire maintenant que nous pouvons encore disposer d'une infinité d'axes — je parle d'axes quadruples dans l'espace-temps — ces axes pourront être choisis arbitrairement à la seule condition de laisser invariable la somme

$$ds^2 = dt^2 - (dx^2 + dy^2 + dz^2).$$

Or c'est un problème de mathématique très facile à résoudre quand on connaît un système de variables x, y, z, t, de trouver tous ceux qui se déduisent du précédent sous la condition de laisser invariable le ds^2, le carré de l'intervalle. La réponse mathématique est la suivante : les transformations cherchées sont des transformations linéaires et homogènes comme celles qui constituent le groupe de Galilée et de Newton, mais ce ne sont pas les mêmes. Elles s'expriment par un nouveau système d'équations du premier degré. Pour faire saisir la différence, je dirai que dans le système de Galilée et de Newton le passage du corps en repos au corps en mouvement se faisait, comme nous l'avons indiqué, conformément aux équations

$$x' = x - vt, \qquad y' = y, \qquad z' = z. \qquad t' = t.$$

Dans les idées de Minkowski, conformes au principe de relativité restreinte, c'est-à-dire à l'expérience, l'opération physique traduite par les formules ci-dessus est irréalisable. Il n'y a pas moyen de transporter un corps de façon que les coordonnées mesurées dans le corps en mouvement, et dans le corps au repos, soient reliées par cette relation. Si nous faisons la substitution en question, elle ne laisse pas invariable le ds^2. Pour obtenir une transformation qui laisse le ds^2 invariant, nous devons modifier les formules de Galilée un petit peu, c'est-à-dire au second ordre près ; il convient d'écrire les transformations cherchées sous la forme suivante. Soit v la vitesse de translation, posons

$$\beta = \frac{1}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{V^2}}}$$

(β est une grandeur qui revient sans cesse dans nos théories et qui ne diffère de l'unité qu'au second ordre près). La transformation sera

$$x' = \beta(x - vt), \qquad y' = y, \qquad z' = z,$$

$$t' = \beta\left(t - \frac{vx}{V^2}\right).$$

Vous voyez qu'il y a une petite retouche à la mécanique de Newton ; toutefois nous n'introduisons que des corrections du second ordre en remplaçant l'unité par β. C'est encore β qui donne la mesure de la contraction de Lorentz.

Minkowski a complété ce qui précède par une représentation géométrique extrêmement élégante mais pas très importante. Je la signale parce qu'elle permet de se rappeler les choses assez commodément. Il a constaté ce fait mathématique évident : c'est que si nous remplaçons dt par $i\,dt$, ou si nous introduisons la nouvelle variable $\tau = it$, alors notre quantité invariable devient exactement une somme de carrés, tous les signes deviennent les mêmes. Les transformations qui laissent notre somme de carrés invariable pourront alors s'appeler véritablement des *rotations dans l'espace à quatre dimensions*, de même que dans l'espace à trois dimensions c'est en faisant une rotation au sens ordinaire du mot qu'on laisse invariable la distance ordinaire. L'artifice de calcul de Minkowski n'est qu'un moyen mnémonique pour se rappeler les transformations qui constituent le groupe de Lorentz et qui doivent être substituées au groupe de Galilée. Ce sont ces transformations qui, dans l'espace à quatre dimensions, où l'axe des temps serait imaginaire, sont des rotations. Mais je n'aime pas introduire dans la physique réelle de variable imaginaire et je n'en parlerai plus. Toute la théorie de la relativité peut se faire sans employer autre chose que des grandeurs réelles.

Je vais encore interpréter les idées de Minkowski par la voie géométrique. La voie analytique sur laquelle je viens d'insister permet de comprendre que, dans l'espace-temps, dans une multiplicité à quatre dimensions, nous ne pouvons plus parler d'un point, cela n'a pas de sens. Nous devons parler d'un point *à un moment donné.* Puisqu'il faut créer un mot pour désigner cette chose simple, nous prendrons le mot d'*événement*, quoiqu'il ne soit pas très bon. Un événement aura comme coordonnées, dans un système d'axes particuliers,

$$x,\quad y,\quad z,\quad t.$$

Je suppose que cet événement ce soit moi à l'instant où je vous parle ; je me placerai à l'origine des coordonnées. Comment devrai-je figurer dans cet espace à quatre dimensions, dans cet univers, les événements qui m'entourent? S'il y a un point qui coïncide à l'origine des coordonnées et du temps, à l'origine de l'univers, avec ma propre position, ce point-événement qui coïncide avec moi décrira à partir de ce moment une certaine trajectoire et il occupera successivement les positions : $x_1, y_1, z_1, t_1, — x_2, y_2, z_2, t_2, — x_3, y_3, z_3, t_3$, etc. Il décrira donc une courbe dans l'univers à quatre dimensions à partir de l'origine o. Parmi ces courbes, il y en a qui sont particulièrement intéressantes : ce sont celles qui sont décrites par les rayons lumineux. Ces courbes sont des lignes droites que je suis très embarrassé pour dessiner sur le tableau parce que je n'ai que deux dimensions à ma disposition et il m'en faudrait quatre. Déjà dans l'espace à trois dimensions on est obligé pour dessiner une figure de laisser une dimension de côté, mais ici il faut que j'en sacrifie deux. Je sacrifierai y' et z' et je me servirai du tableau pour marquer la projection des événements dans le plan des t et des x, c'est le plan qui m'intéresse le plus. Voici l'axe des x tel qu'il est pour moi, et voici l'axe des t tel que je l'ai choisi. Ils sont orthogonaux. Les axes des y et des z doivent être aussi orthogonaux entre eux et à ces deux-là. Ceci posé, les rayons lumineux décrivent des trajectoires qui sont déterminées par la condition d'être des lignes de longueur nulle, c'est-à-dire par cette condition-ci :

$$dt^2 - (dx^2 + dy^2 + dz^2) = 0.$$

Il est facile de voir que dans le plan que j'ai choisi les lignes cherchées seront les intersections de la figure correspondant à l'équation précédente par $dy = dz = 0$. On trouve

$$dt^2 - dx^2 = 0.$$

Cela donne deux droites qui en réalité sont un cône dans l'espace-univers à quatre dimensions. Tous les points qui coïncident avec moi à l'origine des temps et de l'espace sont situés sur des lignes d'univers dont les unes seront à l'intérieur du cône que j'ai dessiné, les autres à l'intérieur du cône opposé par le sommet, je vous parlerai des troisièmes dans un petit instant. Celles qui sont à l'intérieur du cône que

j'ai dessiné représentent des points qui décrivent ce qui va être le futur pour moi, c'est-à-dire t plus grand que o. Ce qui était le passé pour moi, t plus petit que o, c'est le cône opposé par le sommet, lequel contient les lignes d'univers décrites par des corps qui ont pu me donner des nouvelles (par T. S. F. ou autrement), qui ont pu m'envoyer des signaux m'arrivant actuellement. Si les signaux étaient des signaux de T. S. F., ils me sont parvenus par la surface latérale du cône; s'ils ont été transmis par dépêche, ils me sont arrivés par des lignes plus longues qui sont intérieures au cône du passé.

Il y a donc en tout point origine, pour un choix déterminé de coordonnées, un cône du passé et un cône de l'avenir. Si je change d'axes de coordonnées, c'est-à-dire si je prends quatre nouveaux axes orthogonaux (au sens de Minkowski) au lieu des quatre axes dont je suis parti, un peu de réflexion montre que cela équivaut à rapporter la figure

$$t^2 - (x^2 + y^2 + z^2) = 1,$$

qui est un hyperboloïde à quatre dimensions dont la section est

$$t^2 - x^2 = 1,$$

à deux nouveaux diamètres conjugués dans le plan des x, t. Le changement des axes de coordonnées dans l'espace à quatre dimensions n'est pas autre chose que cela. Il équivaut à examiner le même hyperboloïde de base, qui seul est réel, en changeant la perspective des axes de coordonnées. Ce changement de perspective, dont l'importance théorique est capitale, est beaucoup moins important dans la pratique : en posant $V = 1$, nous avons fait choix d'une unité de temps énorme, et les translations réelles donneront toujours une perspective très peu inclinée sur les axes de l'hyperboloïde.

Un petit mot sur les points situés entre le cône du passé et celui de l'avenir. Ne les oublions pas. Quel que soit le changement d'axes que je fasse, les points qui sont dans le cône supérieur seront de mon avenir, ceux du bas seront de mon passé. Mais dans la région intermédiaire certains points qui étaient de l'avenir pourront devenir du passé ou réciproquement suivant le système de référence que je choisis. Pour moi, ils ne sont pas localisables dans le temps, ils n'ont pas de position fixe par rapport à l'instant présent. La conclusion géométrique à laquelle nous arrivons ici fait bien comprendre l'idée d'Einstein dont nous sommes partis, savoir que la simultanéité est une chose relative.

Tout ce que nous venons de dire contient encore une très grosse hypothèse et vous vous doutez bien qu'Einstein ne pouvait la laisser passer sans critique. L'hypothèse à laquelle je fais allusion, c'est que tous les axes permis, légitimes, pour l'étude des phénomènes ne sont plus ceux des groupes newtonien ou galiléen, mais ceux du groupe de Lorentz, ou, ce qui revient au même, les axes quadruplement orthogonaux de Minkowski. De tels axes laissent bien invariables toutes les lois de la Physique pour tous les changements de coordonnées que nous pratiquons. Mais nous nous astreignons alors à ne pratiquer que des changements de coordonnées orthogonaux, nous voulons que notre tétraèdre de référence dans l'espace à quatre dimensions soit quadrirectangulaire. Pourquoi? Parce que c'est plus simple, et que nous y sommes habitués par analogie avec la géométrie cartésienne. Il n'y a aucune autre raison.

Einstein observe qu'un système de coordonnées, un système de référence, ne peut modifier la réalité; il est impossible que la réalité dépende du système que l'on choisit pour l'étudier. On doit pouvoir déterminer les lois de la nature, non seulement dans un système de référence dont les quatre axes d'espace et de temps sont quadrirectangulaires, mais dans un système de coordonnées *absolument quelconque*. C'est là l'énoncé de ce qu'on appelle aujourd'hui *le principe de relativité généralisée*. Le principe de relativité restreinte nous apprend que toutes les lois de la Physique doivent être indépendantes des axes, tant que les axes restent les axes orthogonaux de Minkowski. Einstein ajoute que les lois de la Physique doivent s'exprimer toujours de la même manière *quel que soit* le choix des axes de coordonnées.

Qu'est-ce que cela veut dire? Des assertions aussi générales sont souvent obscures; cependant nous pouvons les comprendre en nous référant à un exemple tout à fait connu, l'exemple de la géométrie ordinaire. Lorsque nous étudions dans la géométrie ordinaire une surface non plane, — sphère ou ellipsoïde — plus généralement une surface courbe quelconque, nous rapportons la position des points de cette surface à trois axes de coordonnées rectangulaires pris en dehors d'elle, c'est-à-dire pris dans notre espace euclidien usuel. Mais il y a encore une autre manière d'étudier ce qui se passe sur une surface sans sortir de cette surface. Par exemple, si nous avons affaire à une sphère, nous pourrons rapporter les positions de chacun des points de cette sphère à un système de coordonnées tracé sur la sphère elle-même sans avoir à parler d'axes de coordonnées pris en dehors d'elle. Ainsi pour définir un certain point sur la Terre, on donne sa position en longitude et en latitude. Cette idée qui nous paraît toute simple tant nous y sommes accoutumés a été développée avec beaucoup de profondeur par Gauss et surtout par Riemann. Si nous avons une surface quelconque ou un fragment de surface, nous pouvons y tracer *ad libitum* un système de lignes absolument arbitraires qui, rapportées à notre trièdre ordinaire, auront par exemple pour équation

$$u(x, y, z) = \text{const.};$$

puis un second système, également arbitraire, ayant comme équation

$$v(x. y, z) = \text{const.},$$

et nous pourrons nous donner la position d'un point quelconque sur la surface en donnant les valeurs de u et de v en ce point.

Dans ces conditions, la distance de deux points sur la surface, distance qui, dans l'espace euclidien, est donnée par

$$ds^2 = du^2 + dv^2$$

devient, comme on le sait,

$$ds^2 = \mathrm{E}(u, v)\, du^2 + 2\,\mathrm{F}(u, v)\, du\, dv + \mathrm{G}(u, v)\, dv^2;$$

c'est une forme quadratique par rapport aux différentielles *du*, *dv*.

Ce que Gauss a remarqué et ce qui a une très grande importance, c'est que toutes les propriétés géométriques de la surface sont connues implicitement quand on connaît l'expression précédente. Elles n'impliquent pas la nécessité de se servir des trois axes cartésiens ordinaires. La connaissance de la forme quadratique ds^2 permet de calculer toutes les lignes tracées sur la surface, leur courbure, leurs relations géométriques, toutes les propriétés intrinsèques qui appartiennent à la surface sont définies de la sorte. Si nous changeons d'axes de coordonnées, si nous prenons un nouveau système

$$u', \quad v',$$

le ds^2 deviendra une fonction analogue avec les indices prime, et définira comme précédemment les mêmes propriétés de la surface. C'est ce qu'on exprime en disant que le ds^2 est un invariant différentiel; il ne change pas quand on change les deux familles de lignes coordonnées sur la surface.

Cette idée a été reprise et développée par Einstein, qui l'a appliquée non pas à une surface à deux dimensions dans notre espace ordinaire, mais à une surface un peu plus difficile à voir par intuition. C'est la surface à quatre dimensions qui constitue l'univers solaire, celle sur laquelle se trouvent tracées les lignes d'univers de tous les événements qui nous intéressent. Cette surface possède, d'après Einstein, le ds^2 suivant :

$$ds^2 = \left(1 - \frac{\alpha}{r}\right) dt^2 - \frac{dr^2}{1 - \frac{\alpha}{r}} - (r^2\, d\theta^2 + r^2 \sin^2\theta\, d\varphi^2)$$

lorsqu'on se sert des coordonnées polaires de Lorentz-Minkowski. Si je me servais d'autres coordonnées, c'est-à-dire si je remplaçais r, θ, φ et t par quatre fonctions du genre des u et v de tout à l'heure, si j'introduisais par conséquent un système tout à fait arbitraire, ds^2 prendra la forme absolument générale

$$ds^2 = g_{11}\, dx^2 + 2g_{12}\, dx_1\, dx_2 + \ldots + 2g_{ik}\, dx_i\, dx_k + \ldots,$$

les g_{ik} étant des fonctions de x_1, x_2, x_3, x_4, et les indices i, k pouvant prendre les valeurs 1, 2, 3, 4, puisque nous avons quatre dimensions. En résumé, c'est une forme quadratique générale à quatre variables qui représente l'élément d'intervalle dans l'univers. Dans le cas le plus général, c'est cette forme et non pas la forme tout à fait particulière d'Einstein qui doit rester invariable.

Nous devons nous défier ici d'une illusion dont la géométrie de Gauss nous prévient d'ailleurs : dans la géométrie de Gauss, lorsque l'élément ds^2 est mis sous forme différentielle quadratique, nous ne pouvons pas toujours, par un changement de variables convenable, le transformer de façon à lui donner la forme $du^2 + dv^2$. On ne peut le faire que dans des cas exceptionnels et lorsque c'est possible on dit que la surface de Gauss est une surface applicable sur le plan. Tel est le cas de la surface du cylindre, de la surface du cône, de toutes les surfaces dont la courbure totale est nulle. Toutes ces surfaces se caractérisent par le fait que par un choix convenable des coordonnées intrinsèques auxquelles on les rapporte, leur ds^2 peut prendre la forme cartésienne

$$ds^2 = dx^2 + dy^2.$$

Par contre, la sphère n'est pas dans ce cas. Il n'y a aucun choix de coordonnées sur la sphère qui permettra d'exprimer son ds^2 sous cette forme, car la sphère n'a pas la courbure zéro.

Dans l'univers à quatre dimensions, la même particularité se présente nécessairement. C'est une illusion de se dire *a priori* que le ds^2 doit pouvoir se ramener à une somme du type pseudo-euclidien

$$ds^2 = dt^2 - (dx^2 + dy^2 + dz^2).$$

Une telle réduction voudrait dire que l'espace à quatre dimensions a aussi, en quelque sorte, une courbure nulle, qu'il est aussi applicable sur un espace euclidien. Ce n'est certainement pas le cas général et les mathématiciens savent quelles conditions analytiques doivent être réalisées pour que le ds^2

soit réductible à la forme euclidienne. Quand ces conditions ne sont pas vérifiées, l'univers n'est pas applicable sur le plan à quatre dimensions.

La mécanique de Galilée, de Newton, de Lorentz, de Minkowski, avait admis *a priori* la réduction dont nous venons de parler, elle posait *a priori* un univers du type euclidien. Le fait que ces différentes étapes de la Science n'étaient pas très éloignées de la vérité, montre que l'univers n'est pas éloigné d'être euclidien dans les régions que nous connaissons. Mais au point de vue des principes, il ne faut pas croire qu'il soit euclidien nécessairement et toujours. Tout ce qu'on peut dire, c'est que dans une sphère suffisamment petite, allant par exemple de la Terre au Soleil, il l'est pratiquement. Dans cette petite région, dx, dy, dz sont des quantités qui sont encore des différentielles, ds est encore un intervalle infiniment petit quand on se borne à l'univers solaire. Les grandeurs commencent à devenir considérables quand on sort très loin de notre univers solaire.

En d'autres termes, nous pouvons donner au principe de relativité généralisée d'Einstein, la forme suivante. « Les lois de la Physique doivent être invariables pour tout changement de coordonnées, quel qu'il soit (et non pas seulement pour les coordonnées rectangulaires); le ds^2 le plus général doit se conserver dans toute transformation. » Nous ne devons pas supposer le ds^2 euclidien, il ne l'est que dans des cas particuliers, tout en le demeurant d'une manière approchée dans notre univers solaire.

On peut dire encore que notre univers solaire constitue un plan tangent à l'univers total : le plan tangent est euclidien, bien que la surface prise sur une étendue notable ne le soit pas.

Si Einstein n'avait énoncé que ce résultat, ce serait déjà fort important parce que cela limiterait forcément la forme des lois physiques utilisables. Celles-ci sont désormais astreintes à la condition d'invariance, leur expression analytique doit être la même pour tout changement de coordonnées quel qu'il soit. Nous énonçons là une condition restrictive très sévère qui éliminera *a priori* certaines lois physiques et en laissera d'autres comme acceptables. Mais quelle que soit l'importance de cette remarque, elle ne suffirait pas à créer une physique nouvelle, à nous dire quelles sont les lois vraies parmi toutes celles que nous pouvons choisir et qui satisfont à la condition d'invariance. Aussi Einstein a-t-il eu le soin de faire une nouvelle découverte pour suppléer à cette lacune. Il a cherché parmi les lois physiques satisfaisant à la condition d'invariance quelles sont les plus simples, celles qui peuvent être admises sans entraîner des calculs inextricables, celles qui forment la généralisation naturelle de la théorie newtonienne. L'idée qui l'a guidé est un peu abstraite, et cependant elle n'était pas tout à fait nouvelle. Gauss, puis Riemann, l'avaient entrevue déjà.

L'idée d'Einstein est que les coefficients g_{ik} de la forme quadratique ds^2 inscrite au tableau, qui nous apparaissent comme des grandeurs purement numériques ou algébriques, sont des *grandeurs physiques;* que la nature de l'espace, la géométrie dans cet espace, le degré de courbure de l'univers, etc., sont des choses qui dépendent des événements physiques et qui évoluent avec eux. Lorsqu'on envisage dans l'univers une région où il n'y a ni matière, ni électricité, ni rien de ce qui ressemble à un agent physique, cet état de vide se traduit par certaines valeurs des coefficients g_{ik}. Au contraire, dans des régions où il y a de la matière, de l'électricité, ou de l'éther, cela modifie les coefficients g_{ik}. En d'autres termes, la valeur numérique des éléments g_{ik}, qui déterminent la forme de la *surface-univers*, est conditionnée par le contenu même de cet univers. Ceci ne doit pas nous sembler absolument nouveau et encore moins choquant. Rappelons-nous que l'équation du potentiel newtonien

$$\Delta v = 0$$

est vérifiée dans les régions où il n'existe pas de charge électrique. Au contraire, dans les régions où il y a des charges, nous avons

$$\Delta v = 4\pi\rho,$$

ρ désignant la densité de l'électricité. Nous déterminons ainsi un potentiel électrique dont la forme dépend de la nature des réalités électriques présentes. Pour Einstein, les g_{ik} sont des *potentiels de gravitation* qui se comportent comme le potentiel électrique; leur valeur dépend aussi de ce qui existe dans l'univers que l'on étudie, soit comme matière au sens ordinaire, soit comme tension ou comme énergie.

Il ne suffisait pas de se contenter de cette vue générale; il fallait encore la mettre sous forme précise. Ici, je passerai les intermédiaires, les calculs laborieux qu'Einstein a dû faire et les résultats qu'il a eu lui-même beaucoup de peine à obtenir. Ses idées ont suivi une marche compliquée. Le résultat final seul nous intéresse. Einstein est arrivé à établir en partie par voie déductive, en partie par analogie les lois de la gravitation, c'est-à-dire les équations aux dérivées partielles qui relient les fonctions g_{ik} aux coordonnées *arbitraires* x, y, z, t, et aux grandeurs servant à spécifier les phénomènes réels.

Par exemple, si nous savons qu'en un certain point nous avons un champ électrique E et un champ magnétique H, Einstein a écrit des équations aux dérivées partielles qui permettent de préciser la valeur de g_{ik} en fonction de ces grandeurs physiques concrètes. Les équations d'Einstein, sous leur forme générale, ne nous intéressent pas. Je veux seulement y faire allusion dans un cas particulier qui nous intéresse beaucoup, c'est le cas de notre univers solaire, le cas où la matière qui détermine les g_{ik} est un centre attirant unique, considéré comme au repos dans un univers symétrique par rapport à ce centre. Dans ce cas, les équations de gravitation d'Einstein se simplifient. Ces équations, assez compliquées quand on les prend sous leur forme la plus générale, deviennent maintenant tout à fait maniables et leur intégration conduit au résultat suivant : on trouve que le ds^2 a la forme indiquée plus haut; le coefficient de dt^2 est

$$\left(1 - \frac{\alpha}{r}\right),$$

α désignant une quantité constante et petite par rapport au rayon de l'orbite. Je prends les coordonnées polaires pour tenir compte de la symétrie du problème. Le coefficient de dr^2 est l'inverse de la même quantité :

$$\frac{1}{1-\frac{\alpha}{r}}.$$

Les autres termes sont les mêmes qu'en coordonnées polaires ordinaires, c'est-à-dire

$$r^2\, d\theta^2 + r^2 \sin^2\theta\, d\varphi^2.$$

Telle est l'expression de ds^2 pour un univers dans lequel il n'existe qu'un seul centre attirant ponctuel et au repos, autour duquel règne la symétrie sphérique. Vous voyez que si nous faisons abstraction des termes correctifs en $\frac{\alpha}{r}$, qui sont de petites quantités, nous retrouvons l'élément linéaire de la géométrie ordinaire, le ds^2 euclidien. Les termes correctifs, quelque petits qu'ils soient, existent néanmoins et ceci suffit à nous faire admettre que dans la région entourant le Soleil, l'univers n'est pas euclidien ou tout au moins pas rigoureusement euclidien. Si nous l'avons pris comme tel au voisinage de la Terre, c'est parce qu'il l'était approximativement, mais nous avons grande chance de trouver qu'il l'est moins si nous nous rapprochons du Soleil, car nous finirons par arriver à une région où les termes $\frac{\alpha}{r}$ sont loin d'être négligeables.

Nous ne pouvons parvenir à cette région, mais les planètes y parviennent. Parmi celles qui se rapprochent le plus du Soleil, nous choisirons Mercure. Nous savons que la planète Mercure décrit une orbite assez voisine du Soleil, et l'on peut se demander si cette orbite n'est pas influencée par la courbure de l'espace où elle réside. Vous avez certainement entendu parler d'une inégalité que les astronomes ont signalée dans le mouvement elliptique de Mercure et qui consiste en ce fait, que le périhélie, c'est-à-dire le point de l'orbite le plus rapproché du Soleil, n'est pas absolument fixe dans l'espace. Dans le cours des siècles il change lentement de place et l'ellipse décrite par Mercure, au lieu de se recouvrir à chaque révolution, se déplace elle aussi en tournant dans l'espace. Ce déplacement peut nous sembler petit, mais il paraît notable aux astronomes, il est de $40''$ d'arc par siècle. Toutes les autres particularités du mouvement de Mercure avaient été expliquées par la théorie newtonienne. On avait rendu compte de différentes anomalies par l'action de Jupiter, mais il restait dans le mouvement du périhélie une grosse cause d'erreur inconnue.

C'est une chose extrêmement remarquable qu'Einstein ait trouvé exactement la valeur de l'écart à expliquer en supposant que le ds^2, au lieu d'être celui des astronomes, est celui auquel conduit la théorie de la relativité. Je dis que ce résultat est remarquable, parce qu'il ne repose *sur aucune hypothèse.* Einstein a écrit que Mercure évolue librement autour du Soleil et il n'a fait appel à aucune hypothèse additionnelle; c'est l'application directe de la théorie, sans introduction d'aucune constante arbitraire, qui réussit à expliquer le mouvement de Mercure : la constante α qui figure dans nos équations n'est pas une constante arbitraire; elle est immédiatement liée à la masse du Soleil.

Voilà le gros succès de la théorie einsteinienne et ce qui l'a fait apprécier tout de suite en Angleterre, un peu plus tard en France.

Il y a encore d'autres résultats expérimentaux que la théorie d'Einstein prévoit et qui ont reçu des confirmations expérimentales des plus intéressantes, mais à mon avis un peu moins éclatantes que celle dont je viens de vous parler. Les effets observés sont un peu plus petits, et n'ont pas la précision des mesures astronomiques. De plus, les concordances, tout en étant bonnes, sont moins parfaites. Je ne citerai que deux exemples. L'un, que vous comprendrez tout de suite, c'est la prévision un peu paradoxale dans la théorie ancienne d'une déviation de la lumière quand elle passe près du Soleil. D'où vient cette déviation? De ce que la lumière décrit un chemin qui est une ligne géodésique de longueur nulle. Les lignes géodésiques dans l'espace euclidien sont des lignes droites, mais sur un espace courbé, ce ne sont pas des lignes droites, sur une sphère par exemple ce sont des grands cercles, et sur la surface correspondant au ds^2 d'Einstein ce sont des courbes que l'on peut calculer analytiquement, mais qui ne sont pas des lignes droites. Elles en diffèrent peu, et la courbure de ces trajectoires peut se calculer. Cette courbure se mesure très simplement en fonction de α, on trouve que les rayons lumineux émanés des étoiles et qui passent tout près du disque solaire, ceux qui sont le mieux placés pour en subir l'influence, sont soumis à une déviation qui est de l'ordre d'une seconde d'arc (1",7 d'arc d'après Einstein). La seconde d'arc n'est pas un angle bien grand, mais c'est encore un angle que les astronomes déterminent avec une assez grande précision. Vous n'êtes pas sans avoir entendu parler de la grande expédition organisée par la Société Royale de Londres il y a deux ans, qui avait pour objet de vérifier cette déviation de la lumière au voisinage du Soleil. On a voulu profiter d'une éclipse totale de Soleil pour voir si les rayons lumineux qui rasent le disque solaire subissent une déviation, si, lorsque nous les voyons près du Soleil, les étoiles n'occupent pas la position qu'elles ont ordinairement dans le ciel. Il fallait, pour faire cette vérification, profiter d'une éclipse totale, sans laquelle les étoiles proches du Soleil ne sont pas visibles. Les observations faites sur la côte du Brésil et en Afrique occidentale ont donné des résultats assez bons, étant donné les difficultés que l'on avait à surmonter et les causes d'erreur dont il fallait tenir compte. Elles ont fourni en somme une bonne vérification des calculs d'Einstein. On a fait une photographie du ciel pendant l'éclipse, on a noté la position des mêmes étoiles quand le Soleil était éloigné, et l'on a trouvé un petit écart, de l'ordre de 1",5. C'est une concordance des plus remarquables, le phénomène n'étant prévu que par la théorie et n'ayant pas été soupçonné autrement.

Enfin, on a obtenu encore un troisième résultat, d'ordre expérimental également, mais un peu moins précis. Je vous

...me parce qu'on n'a pas accumulé de vérifi... ...ariées dans cet ordre d'idées nouveau. C'est le ...nt des raies du spectre solaire vers le rouge, lors... ...n les compare aux raies du spectre d'une même subs...ance étudiée sur terre. Par exemple le spectre du fer, qui existe dans le Soleil, doit avoir ses raies un petit peu déplacées vers le rouge par rapport aux raies de l'arc au fer étudiées sur terre. Pourquoi? Parce que si nous plaçons une horloge près du Soleil en un point fixe ($dr = d\theta = d\varphi = 0$), il ne restera plus dans le ds^2 quz le terme $\left(1 - \frac{\alpha}{r}\right) dt^2$: c'est le carré ... *temps local*, marqué par l'horloge, temps qui est différent ...tre temps à nous (dt). Un atome qui vibre, c'est une ...loge ; il décrit des révolutions autour d'un certain centre, il a des vibrations périodiques. Dans le cas où l'atome rayonne, l'horloge atomique doit avoir une fréquence locale qui diffère de la fréquence donnée par la même horloge sur terre. Le rapport des fréquences est celui de $\sqrt{1 - \frac{\alpha}{r}}$ à 1. Le déplacement vers le rouge a été recherché avec soin par beaucoup de spectroscopistes et les résultats sont assez favorables, mais il faut avouer que ce genre de recherches est fort di...ile et qu'il existe d'autres causes capables de déplacer les raies lumineuses. Néanmoin... ...es expériences, elles aussi, ont donné des résultats favorables à la théori... d'Einstein; le déplacement vers le rouge est de $2{,}07 . 10^{-6}$, c'est-à-dire qu'il s'agit d'un déplacement de l'ordre du millionième de la longueur d'onde.

Ces vérifications expérimentales qui sont certainement remarquables ont, jusqu'à présent, été les seules qu'on ait pu donner en faveur de la théorie d'Einstein et il serait fort intéressant d'en rechercher d'autres. Le bon sens indique qu'il ne sera pas très facile de trouver beaucoup de vérifications de la théorie dans le domaine ordinaire, dans la physique de laboratoire, précisément parce que cette théorie d'Einstein introduit des ordres de grandeur tout à fait immenses par rapport à ceux auxquels nous sommes habitués. Elle introduit comme une grandeur moyenne, usuelle, le rayon

de courbure de l'univers. C'est la premi
risque à envisager des ordres de grandeur aussi
Par conséquent, si nous voulons rechercher des v
expérimentales de la théorie d'Einstein, il est plus raison
et peut-être moins téméraire d'en attendre de l'étude d
monde cosmique, de l'astronomie la plus lointaine, plutôt
que des recherches de laboratoire.

Quoi qu'il en soit, indépendamment même de ces vérifica-tions expérimentales, on doit considérer comme un argu-ment très important en faveur de la théorie d'Einstein, son extraordinaire cohésion interne, sa logique parfaite, et le fait qu'elle unit entre eux un grand nombre de domaines jusqu'à présent étaient restés disjoints. Je dois rapp terminant ce qui a été le point de départ d'Einstein, et qui ne contribue pas peu à la séduction de sa théorie, à savoir le fait que la masse pesante et la masse inerte sont identiques par définition. C'est là un résultat qui découle naturellement des conceptions nouvelles et qui n'avait, d'aucune manière, été expliqué jusqu'ici.

FIN.