Initiation aux Théories d'EINSTEIN

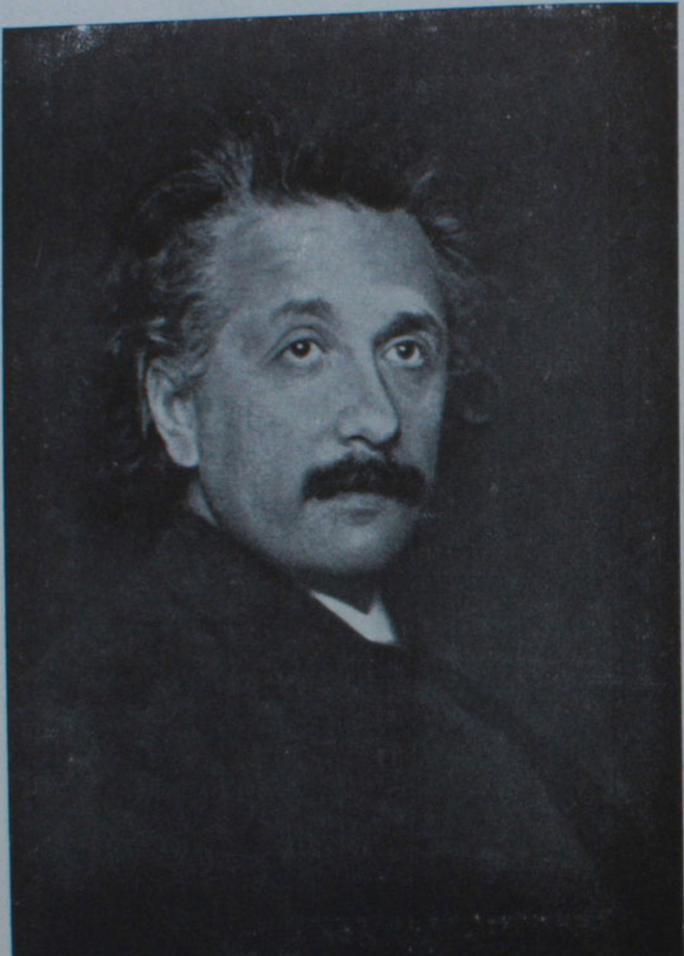
Par Gaston MOCH

Bibliothèque Larousse

Initiation aux Théories D'EINSTEIN

NOUVELLE EDITION
REVUE ET CORRIGÉE

NEUVIÈME MILLE



A. Einstein.

Initiation aux Théories d'EINSTEIN

Par Gaston MOCH
Ancien élève de l'École Polytechnique

Préface de A. BERGET
Professeur à l'Institut Océanographique

JE SÈME À TOUT VENT

10 Figures
1 Portrait hors texte

Bibliothèque Larousse
Paris. — 13-17, rue Montparnasse

DU MÊME AUTEUR :

Artillerie : Des canons à fil d'acier (1887). — Expériences américaines sur le frettage des bouches à feu (1889). — Notes sur le canon de campagne de l'avenir (1890). — L'artillerie de l'avenir et les nouvelles poudres (trad. de l'anglais, de Longridge, et annoté, 1893). — Vue générale sur l'artillerie actuelle (1895).

Art militaire : La poudre sans fumée et la tactique (1890).

Histoire : Sedan : les derniers coups de feu (1885). — Histoire de Norvège (trad. de l'allemand, de John Lund, 1899).

Linguistique : La question de la langue internationale et sa solution par l'espéranto (1897). — De la prononciation de l'espéranto (1907) *. — L'anglais tel qu'on le parle, de Tristan Bernard (1907)*. — Le Roi des montagnes, d'Edmond About (1909) *. — De la transcription des noms propres en espéranto (1910)*. — X-Lexique, vocabulaire de l'argot de l'Ecole Polytechnique (1910). — Pensées de Riquet ; Les Juges intègres, d'Anatole France, avec préface justificative (1921) **.

Organisation nationale : La défense nationale et la défense des côtes (1894). — La défense des côtes et la marine (1895). — Artillerie et budget (1897). — L'armée d'une démocratie (1899). — La réforme militaire : vive la milice ! (1900). — Rapport sur la création d'un lycée à Monaco (1910). — La représentation vraiment proportionnelle (1910).

Philosophie scientifique : La relativité des phénomènes, édition revue (1922).

Politique internationale : L'Alsace-Lorraine devant l'Europe (1894). — Autour de la Conférence interparlementaire (1895). — Alsace-Lorraine, réponse à un pamphlet allemand (1895). — Une voix d'Alsace (*Eine Stimme aus Elsass*) (1896). — Ce que coûte la paix armée, et comment en finir (1900). — L'ère sans violence (1901). — Vers la Fédération d'Occident : désarmons les Alpes ! (1905). — Sur le désarmement : chimères et réalités (1906)*. — Histoire sommaire de l'arbitrage permanent, édition revue (1910). — La question de la Légion étrangère (1914). — La garantie de la Société des Nations (1916).

---

* En espéranto primitif.
** En espéranto réformé (ido).

PRÉFACE

Encore un livre sur la relativité! va s'écrier le lecteur.

Mon Dieu! oui, encore un. Mais celui-ci est vraiment le livre court, simple, clair, précis, que souhaitaient tous ceux qui, n'ayant pas d'éducation scientifique approfondie, sont cependant curieux de pénétrer les mystères de ces « théories d'Einstein » dont tout le monde parle, et que si peu de gens comprennent.

Muni du solide bagage mathématique que lui confère sa qualité d'ancien polytechnicien; fortifié par les beaux travaux de science appliquée qu'il a faits au cours de sa carrière d'officier d'artillerie et de secrétaire de la Commission d'examen des inventions intéressant la Défense nationale, le commandant Moch n'a pas hésité à aborder ce difficile problème d'exposer, sans une seule formule, *l'essentiel du principe de relativité, de façon à le faire comprendre de tout lecteur ayant une bonne instruction, même très élémentaire, à condition qu'il consente à réfléchir un peu.*

Et je suis convaincu que ce problème, il l'a victorieusement résolu.

Je ne veux pas déflorer le livre en le résumant: il est impossible de résumer un « résumé ». Mais je ne puis m'empêcher de signaler les lumineuses expositions par lesquelles l'auteur explique les conditions de la coïncidence dans l'espace, de la simultanéité dans le temps; la rigueur avec laquelle il montre à l'aide de chiffres précis, les conséquences « quantitatives » du principe de relativité; la loyauté avec laquelle, quoique partisan enthousiaste des vues d'Einstein, il expose les objections qu'on a pu lui faire; le grand sens scientifique, enfin, dont il fait preuve en faisant ses réserves sur la grandeur de la vitesse de la lumière considérée comme vitesse « limite ».

Celui qui aura lu ce livre pourra, alors, tenter la lecture des autres : il sera suffisamment « initié » à la relativité pour en aborder de plus amples expositions ; il sera à même de s'en faire une idée personnelle.

Que vivront les théories d'Einstein ? Ce que, comme les roses, vivent toutes les théories : l'espace d'un matin. La science, essentiellement perfectible par son essence même, se sert des théories comme d'outils nécessaires. Mais ces outils ne sont pas définitifs; ils sont appelés à être remplacés par d'autres, mieux conçus, mieux construits, plus voisins de la perfection. Mais, de même qu'avec leurs outils primitifs, les artisans du moyen âge nous ont laissé d'immortels chefs-d'œuvre, de même chaque théorie, fût-elle remplacée plus tard par une autre plus proche de l'absolue Vérité, laissera quand même, comme preuve de sa valeur, les monuments qui auront été construits avec son aide, les découvertes qu'elle aura contribué à faire éclater.

Le grand mérite des conceptions d'Einstein aura été, en tout cas, d'amener un prodigieux mouvement d'idées, d'avoir provoqué des travaux remarquables. Certes ses vues attendent encore des confirmations que, seules, des expériences cruciales pourront fournir. Mais par le courant d'idées qu'elles auront provoquées, elles marqueront une des plus importantes étapes dans l'histoire des conquêtes du génie de l'homme : ce n'est pas là un mince mérite.

Et tout cela, je suis certain que la lecture de ce livre, petit par le volume et grand par ce qu'il contient, permettra d'en avoir la très nette compréhension.

ALPHONSE BERGET

Professeur à l'Institut Océanographique.

AVANT-PROPOS

La présente étude ne fait pas double emploi avec le volume que j'ai publié sur le même sujet, à la fin de novembre dernier, dans la Bibliothèque de Philosophie scientifique (1) ; *elle doit le remplacer ou le compléter, selon le lecteur qu'elle touchera.*

L'autre ouvrage, la Relativité des phénomènes, *s'adresse, non certes aux savants, pour qui je ne me permettrais pas d'écrire, mais aux lecteurs pourvus d'une certaine culture générale, comportant les connaissances mathématiques et physiques du baccalauréat ès sciences.*

Ici, je me suis proposé de répandre dans le grand public, autant que cela est possible, un minimum de notions précises sur la théorie de la relativité ; il s'agissait donc de rendre ce minimum intelligible à tout homme ayant une bonne instruction primaire, — à condition, bien entendu, qu'il soit capable d'attention et de réflexion ; car, si simplement et familièrement qu'on présente ces idées, il va de soi qu'on ne saurait les rendre intuitives comme un roman-cinéma. Vulgariser une connaissance, c'est la communiquer à tous ceux à qui elle peut être accessible, non la ravaler au niveau des esprits vulgaires.

Cet opuscule a donc été composé pour les hommes curieux de savoir, mais qui, se défiant à tort ou à raison de leurs aptitudes, sont effarouchés par le nom rébarbatif de la théorie de la relativité, ainsi que par la vue d'un volume compact et d'allure plus sévère. A beaucoup de ces débutants il suffira. Mais je compte que bon nombre d'entre eux, une fois initiés à des idées aussi captivantes, et rassurés sur leur aptitude à les saisir, seront mis en goût de les pénétrer davantage, en étendue et en profondeur, c'est-à-dire de connaître un plus

---

(1) *La Relativité des phénomènes.* Paris, Flammarion, 1921. Prix : 7 fr. 50.

grand nombre des faits qui s'y rapportent, et d'en mieux comprendre l'enchaînement. Pour eux, cette brochure aura donc joué le rôle d'introduction.

Peut-être rendra-t-elle aussi service à des esprits mieux préparés par leur éducation antérieure. Tel lecteur, muni du léger bagage scientifique secondaire que je désignais plus haut, peut avoir avantage à jeter un coup d'œil d'ensemble sur une matière difficile, avant d'en entreprendre une étude un peu plus poussée. Pour tel autre, enfin, à qui une instruction supérieure a permis de l'aborder directement dans les traités les plus abstraits, il peut être intéressant de la reprendre dans un résumé très modeste, et de reconnaître dans quelle mesure, et par quels raisonnements élémentaires, on peut la rendre accessible aux profanes.

Je ne me dissimule pas l'insuffisance de la tentative que j'ai faite dans ce sens. Puissé-je seulement n'y avoir pas échoué complètement ! Elle n'aura pas été inutile, si ses défauts mêmes déterminent un autre auteur à faire mieux, en vue de donner à Monsieur Tout-le-Monde un aperçu de ces vastes théories, dont la pleine possession est forcément réservée à un petit nombre de favorisés (1).

Mars 1922.

G. M.

---

(1) On remarquera que quelques passages ont été mis entre crochets. Ils ne sont pas indispensables à l'intelligence du texte, et le lecteur pressé ou timide n'aura qu'à les sauter tranquillement, quitte à y revenir plus tard.

INITIATION AUX THÉORIES D'EINSTEIN

INTRODUCTION

1. — Albert Einstein.

« Messieurs, vous êtes en présence du Newton du XX^e siècle, d'un homme qui a opéré, dans l'histoire de la pensée humaine, une révolution plus profonde que Copernic, Galilée et Newton lui-même. »

C'est en ces termes qu'Albert Einstein, s'arrêtant à Londres en juin 1921, au retour d'un voyage triomphal aux Etats-Unis, fut présenté par lord Haldane à un auditoire de savants, assemblé pour entendre une conférence qu'il donnait au *King's College*.

Quelque inouï que fût cet éloge, il n'était nullement excessif. Einstein, en effet, a élargi la mécanique proprement dite et la mécanique céleste jusqu'à faire apparaître les lois de Galilée et de Newton comme de simples cas particuliers de lois plus générales. Et si, sans entrer à ce sujet dans des détails nécessairement réservés aux mathématiciens, nous nous bornons à jeter un coup d'œil sur les conséquences philosophiques de ses découvertes, qui sont accessibles à tous, le nom de Copernic est le seul des trois qu'on puisse rapprocher du sien. Dans le domaine des sciences physiques, Einstein a renouvelé notre conception de l'Univers, comme Copernic seul l'avait fait, trois siècles et demi plus tôt, et comme Lamarck le fit en 1809 en ce qui concerne les sciences naturelles ; et il n'était âgé que de vingt-six ans lorsqu'il posa en 1905 la partie fondamentale de son œuvre, qu'il mit onze années à parachever.

Il faut ajouter que, chez ce grand homme, le caractère est à la hauteur du génie scientifique. Aussi passionné pour le beau et le bien que pour le vrai, Einstein sait flétrir avec une énergie vibrante et ironique tous les abus de notre époque de prétendue civilisation ; et nous avons le devoir de saluer en lui un des quatre savants allemands qui osèrent s'élever publiquement contre le trop fameux manifeste des 93 intellectuels, dès sa publication en octobre 1914 (1). Depuis lors, il n'a cessé de lutter, malgré les persécutions et les menaces de mort, pour la liberté, la justice et l'accord entre les individus et entre les nations. Il est ainsi à la tête des hommes qui s'efforcent de renouer dans son pays la tradition civilisatrice de la Vieille-Allemagne, interrompue durant l'ère de la brutalité bismarckienne. Aussi devons-nous exprimer le regret que, pour lui rendre honneur, la France se soit laissé devancer par les États-Unis et l'Angleterre, et que notre Sorbonne, la mère des Universités, ne l'ait pas encore invité à prendre la parole dans son Grand Amphithéâtre.

2. — La relativité de nos impressions sensitives.

Pour bien faire comprendre ce qu'est la « théorie de la relativité » d'Einstein, il faut commencer par dire qu'elle ne se réduit pas, comme on paraît souvent le croire, à l'énoncé d'une vérité déjà banale.

Il est peu de dictons qu'on entende plus souvent répéter, que celui-ci : « Tout est relatif, tout dépend du point de vue qu'on adopte. » Emprunté à la perspective, qui, selon le point de vue où l'on se place, fait apparaître les objets sous les formes les plus diverses, il est appliqué à toutes les notions intellectuelles ou morales, en passant par les interprétations du monde que nos sens nous procurent.

(1) C'est le physiologiste Nicolaï qui prit l'initiative de cette protestation. Il fut suivi par Einstein, le philosophe Buek et l'astronome W. Fœrster ; la signature de ce dernier avait d'abord été surprise par les « intellectuels ».

C'est à ces interprétations que nous allons nous arrêter un instant, dans cette étude exclusivement consacrée au monde physique

Tout d'abord, il nous faut insister sur ces derniers mots. Rien, dans les travaux dont nous nous occupons, ne touche, si peu que ce soit, aux constructions toutes personnelles, et par conséquent arbitraires, de la métaphysique. Il ne sera question ici que de phénomènes physiques, c'est-à-dire de faits observables, mesurables, et vérifiables par tout observateur ; et le mot « philosophie » n'y est pas pris dans son sens courant, passablement nébuleux, mais dans le sens de synthèse scientifique que lui a donné Auguste Comte.

Aussi avons-nous le droit de nous appuyer sur le principe *nihil est in intellectu, quod non prius fuerit in sensu :* il n'est rien, dans notre entendement, qui n'ait d'abord passé par nos sens. Je ne veux, par là, faire nulle peine, même légère, aux spiritualistes ; je veux dire simplement que nous ne nous occuperons que des notions qui, de l'aveu de tous, relèvent de ce principe ; les autres sont abandonnées aux rêveries des métaphysiciens.

Or, nos sens sont des instruments construits d'une certaine façon, et qui, recevant certaines impressions, les transmettent à notre cerveau sous une forme qui dépend évidemment de la manière dont sont constitués et dont se comportent momentanément ces appareils sensoriels de réception, le système nerveux qui assure la transmission, et le cerveau qui reçoit l'impression, l'élabore, l'enregistre, et la compare avec une précédente. Un être doué de raison, mais autrement constitué que nous, recevra de l'extérieur des impressions différentes, les appréciera différemment, et aura donc une autre notion de l'Univers. Il suffit pour cela que cet être ait évolué dans un autre milieu, tel qu'une autre planète ou notre Terre à une autre époque de son évolution, ou bien que, vivant dans le même milieu que nous, il soit parti d'une autre forme primitive. Les abeilles et les fourmis ont visiblement des moyens, que nous ignorons, de communiquer entre elles ; si elles se sont élevées, ou si elles sont destinées à s'élever jusqu'à échanger des idées philosophiques sur le monde extérieur, ces idées doivent différer singulièrement des nôtres.

Bien des auteurs ont imaginé des conditions extérieures ou des modifications de nos sens, desquelles résulterait pour nous une tout autre conception de l'Univers ; je me suis aussi amusé à ce jeu, dans un article de la *Revue Scientifique*, publié en 1897 sous le titre « De la relativité des connaissances humaines ». Voici un exemple, le plus simple possible, de ces hypothèses.

Il n'y a pas un siècle que l'on connaît les lois de la capillarité, c'est-à-dire des actions mécaniques qui s'exercent entre corps très petits par rapport à nous, et à des distances du même ordre de grandeur : tel, le fait que le liquide contenu dans un cheveu ne s'en écoule pas.

Eh bien, supposons un être pensant réduit à cette échelle, c'est-à-dire à la dimension d'une très petite fourmi. Il ne pourra ni remplir ni vider un vase de dimension correspondant à sa taille. Une goutte de rosée sera pour lui un vaste solide impénétrable. Les pierres qu'il sera capable de lancer flotteront sur l'eau. Il n'aura pas la force de produire un frottement suffisant pour allumer un objet quelconque. En raison de ces faits, et de bien d'autres analogues, quelles seront ses idées en physique et en chimie ?

Soit au contraire un géant mesurant 35 mètres, c'est-à-dire haut comme la Colonne Vendôme. Sa taille ne serait que vingt fois celle d'un homme. Mais il pèserait 600 tonnes; et il ne devrait se déplacer qu'avec des précautions infinies ; car s'il marchait à l'allure du pas, il parcourrait, non 1 m,50, mais 30 mètres par seconde, soit 108 kilomètres par heure, comme un train rapide lancé à toute vapeur. Ses semelles, et parfois le sol même, prendraient feu par le frottement.

Il est d'ailleurs inutile de former de ces hypothèses arbitraires pour comprendre l'influence de nos sens sur nos conceptions : il suffit de faire un retour sur nous-mêmes. Il n'existe pas deux hommes identiques, ni même un homme dont les organes sensoriels de droite et de gauche soient identiques. D'où, la diversité de nos jugements, particulièrement en matière d'art. L'oculiste Émile Javal se plaisait à diagnostiquer l'état de la vision des peintres d'après leurs tableaux ; il me disait qu'Henner était certainement hypermétrope, et que Carrière ajoutait le daltonisme à l'hypermétropie. S'il vivait encore, lui qui fit des travaux si importants sur l'astigmatisme, il ne manquerait pas d'étudier les variétés innombrables de cette infirmité chez tant de dessinateurs actuellement à la mode, qui semblent voir le monde dans un miroir déformant.

Ainsi, nous ne connaissons le monde que par le rapport que nous en font nos sens ; et ce rapport n'est pas seulement fallacieux : il est subjectif, il diffère d'un individu à l'autre, il ne nous fournit que des idées relatives.

***

Mais, si les qualités que nous attribuons aux choses varient selon l'observateur et selon les circonstances de l'observation ; si même les proportions et les formes dépendent de la situation de l'objet par rapport à l'observateur, il restait trois idées fondamentales auxquelles on s'accordait à attribuer un caractère absolu, si bien qu'on ne songeait même pas à se demander si cette opinion était fondée. Ces idées sont celles d'espace, de temps et de masse. Je veux dire par là qu'on admettait, comme article de foi, qu'une longueur d'un mètre, une durée d'une heure, ou une masse d'un kilogramme, mesurée avec des instruments parfaits, en prenant toutes les précautions voulues et en faisant les corrections nécessaires, reste toujours égale, où qu'on la transporte, à ce que le Bureau international des Poids et Mesures appelle un mètre, une heure, ou un kilogramme.

Or, Einstein a démontré qu'il n'en est rien ; la longueur, la durée et la masse sont des notions relatives : elles dépendent de l'état de mouvement de l'opérateur par rapport à l'objet de la mesure.

Mais, si nouvelle et si importante que soit cette conception, elle n'est qu'une partie de l' œuvre ; on porterait un jugement bien simpliste, si l'on ne voyait dans celle-ci que la généralisation du dicton « tout est relatif ».

3. — L'ordre d'importance des théories d'Einstein.

On voit pourtant ici, dès maintenant, pourquoi le nom de Copernic vient naturellement à l'esprit quand on veut qualifier l'importance philosophique des découvertes d'Einstein.

Avant Copernic, les hommes se représentaient l'Univers comme un édifice à trois étages, composé d'un sous-sol, l'Enfer, d'un plateau circulaire, la Terre, et d'une coupole, le Firmament. De bas en haut : le séjour des damnés, celui des vivants, et celui de Dieu et des bienheureux. Et je dis bien « de bas en haut » : l'Univers avait un bas et un haut, comme une caisse d'objets fragiles. Il y avait une direction privilégiée, la verticale, la direction noble de l'ascension vers le Ciel, marquée par l'attitude qui distingue l'homme des animaux. Le Ciel tournait autour de la Terre, et tout l'Univers était créé pour elle, c'est-à-dire, en définitive, pour l'homme.

Copernic nous a enseigné que la Terre est une petite boule qui tourne autour du Soleil, qu'elle n'est pas le centre et la raison d'être de l'Univers, que tout autour d'elle se dressent des verticales équivalentes, que notre « haut » est le « bas » de ceux qui vivent à nos antipodes, en un mot, que *la notion de verticale est relative.*

A la vérité, Aristarque de Samos avait professé ces idées ; mais elles n'avaient pas prévalu, et furent oubliées pendant dix-huit siècles, jusqu'à ce que Copernic les découvrît dans un écrit d'Archimède. Il les précisa, les publia en 1543, et les imposa enfin aux hommes. Encore y fallut-il bien du temps : un siècle plus tard, Galilée fut persécuté pour les avoir soutenues ; et, encore en 1829, le clergé de Varsovie protesta contre une glorification de Copernic.

De même, avant Einstein, on croyait que l'idée de temps était absolue, que le temps s'écoule de la même manière dans l'Univers entier. Par exemple, deux amis pouvaient se promettre, au moment où l'un d'eux s'embarquait sur un paquebot, d'échanger un radio le lendemain à midi. Sans doute, il leur fallait spécifier qu'il ne s'agirait pas, pour le voyageur, de l'heure du méridien où il se trouverait, et qu'il s'en rapporterait à son chronomètre, réglé sur celui de l'autre ; mais moyennant cette précaution, leur convention semblait précise. Eh bien, strictement parlant, elle n'a aucun sens : une fois le paquebot en route, la marche des chronomètres y paraît modifiée, — à la vérité, dans une proportion infinitésimale.

Même observation pour les signaux que la tour Eiffel est chargée d'émettre périodiquement, et qui permettent aux navires de régler leurs montres et de déterminer leur longitude : on sait aujourd'hui que ce procédé n'est valable que parce que son erreur de principe est insensible, en raison de la faible vitesse des navires.

Pareillement, toutes les mesures de longueur et de masse effectuées jusqu'ici sur des corps en mouvement par rapport à l'opérateur sont erronées, du moins en théorie ; car, dans la pratique courante, les vitesses de ces corps ne déterminent que des variations insignifiantes.

D'autres conséquences, plus importantes encore, seront indiquées plus loin. Ce qui précède suffit à faire comprendre que la révolution mentale déterminée par Einstein équivaut à celle que nous devons à Copernic. Elle porte sur le fondement même de nos conceptions scientifiques.

Mais il ne faut pas se méprendre sur sa nature. Quand on cherche à extraire la substance de ces doctrines pour la présenter au grand public, c'est-à-dire à les exposer en langage courant, sans l'aide des mathématiques, on n'a d'autre ressource que de les concrétiser par des images, des analogies, et l'on court de multiples dangers : danger de n'être pas clair ; danger de formuler une image par à peu près, qui ne fait que côtoyer la réalité, et donnera des idées fausses au lecteur (nous en verrons des exemples) ; danger enfin de se laisser emporter par l'enthousiasme, de s'égarer soi-même, et d'exprimer une vue nettement inexacte.

C'est ainsi qu'un admirateur d'Einstein écrivait récemment que sa théorie a été « comme une cartouche de dynamite dans les fondations de la science ».

Erreur complète, et des plus dangereuses. Si elle se répandait, elle ne pourrait que discréditer complètement la science, dont certains rêveurs sont toujours disposés à proclamer la faillite, et que le public se représenterait comme une sorte de jeu de massacre, où Einstein aurait démoli l'œuvre de ses prédécesseurs, en attendant de subir à son tour pareille mésaventure.

Einstein n'a nullement démoli cette œuvre. Il l'a perfectionnée, développée, incorporée dans un édifice plus vaste et bien ordonné, dont elle demeure le fondement, et à l'intérieur duquel elle continue de jouer le rôle pour lequel elle a été faite, ses nouveaux développements ne s'appliquant qu'à des conditions nouvelles, dont les précédentes sont un cas particulier. Lui-même a donné successivement deux théories de la relativité, une « particulière » ou « restreinte », en 1905, et une « généralisée » en 1916; et comme on s'était empressé de le narguer en disant que la seconde détruisait la première, il répondit fort judicieusement que « c'est, pour une théorie physique, le sort le plus beau que d'ouvrir la voie à une théorie plus large, dans laquelle elle survit comme cas-limite ».

Son mérite est assez grand pour qu'il ne faille pas vouloir lui en attribuer un autre, prétendu plus grand, mais qui serait le contraire d'un mérite.

CHAPITRE PREMIER

LA RELATIVITÉ CLASSIQUE

4. — Les lois de la nature.

L'idée de loi physique découle directement du vieux principe du déterminisme naturel : les mêmes causes produisent les mêmes effets. Lors donc qu'on a recueilli un nombre suffisant de données expérimentales, exprimées avec précision par des nombres, et faisant donc ressortir d'une manière certaine l'enchaînement naturel de plusieurs effets, on est en mesure d'énoncer le rapport invariable, nécessaire, qui existe entre le phénomène final et chacun de ceux qui l'ont précédé et déterminé ; et ce rapport, qui peut être schématisé sous cette forme que *pour une certaine quantité A de tel fait, il se produit nécessairement une certaine quantité B de tel autre*, est ce qu'on appelle *la loi du phénomène*, qui permet de prévoir la production de ce phénomène et ses modalités, dans des circonstances données.

Les lois particulières des divers phénomènes ne sont pas isolées. Lorsqu'on en possède un certain nombre, concernant des phénomènes analogues, on arrive à les condenser en d'autres formules, qui les contiennent, et qui permettent de les retenir facilement toutes ensemble : on obtient ainsi les *lois générales*, grâce auxquelles on peut prédire un grand nombre de phénomènes.

Mais il faut se rendre compte des limites de précision entre lesquelles ce travail est possible. Notre esprit n'est capable d'embrasser qu'un petit nombre de faits à la fois ; et le phénomène naturel le plus élémentaire est effroyablement compliqué par la multitude des causes qui contribuent à le déterminer. Si on voulait aborder la question de front, en faisant entrer toutes ces causes dans la description du phénomène, on serait en plein chaos. Il est indispensable de commencer par négliger toutes les circonstances accessoires, pour ne retenir que celles, en très petit nombre, dont l'effet est prédominant. On obtient ainsi une première description approchée, que l'on perfectionne ensuite par approximations successives, à mesure que l'on est à même de pénétrer plus avant dans les détails, comme un artiste commence par ébaucher son dessin en traçant un contour général qu'il complétera par la suite. Ou encore, si l'on préfère, on dira que le physicien commence par représenter un phénomène par une courbe tracée au moyen d'un instrument grossier, tel qu'un pinceau plat, qui fournit, non une ligne, mais une bande assez large; plus tard, un pinceau rond, un crayon, un tire-ligne pourront lui donner des représentations de plus en plus approchées. Chacune de ces représentations constitue un progrès sur la précédente, mais chacune d'elles est valable: *on savait*, à un certain moment, que tous les points observés sont à l'intérieur d'une bande large d'un centimètre, et *l'on sait*, plus tard, qu'ils sont tous sur un trait d'un dixième de millimètre, *contenu dans cette bande*.

Ce travail de perfectionnement progressif peut résulter, soit du progrès des moyens d'observation, soit du besoin où l'on est de considérer, dans un problème nouveau, des éléments qu'on était en droit de négliger auparavant, et qu'on négligeait donc sciemment.

C'est ainsi que, pour les premiers astronomes, les planètes parcouraient des orbites circulaires, soit qu'on leur attribuât, avec Ptolémée, un parcours épicycloïdal autour de la Terre, soit que, quatorze siècles plus tard, Copernic eût montré qu'elles tournaient autour du Soleil, et que la Terre n'était qu'une d'elles. Plus tard, Kepler leur assigna des orbites elliptiques, faiblement excentrées. Puis, on observa dans leur mouvement des perturbations, dont la gravitation newtonienne suffit à rendre compte. Enfin

Leverrier constata une dernière perturbation, celle de Mercure, qui fut expliquée par la loi d'Einstein, plus approchée que celle de Newton. Si, dès le début de l'astronomie, on avait pu déterminer la route de cette planète, telle qu'on la connaît aujourd'hui, personne n'aurait su la figurer par une courbe continue ; faute d'avoir parcouru les étapes intermédiaires, on n'y aurait vu qu'une série de positions arbitrairement éparpillées dans le ciel. C'est ce que Poincaré exprimait en écrivant : « Si Tycho avait eu des instruments dix fois plus précis, il n'y aurait jamais eu ni Kepler, ni Newton, ni astronomie. »

Quant aux données que l'on est maître de négliger ou non, selon la question traitée, en voici un exemple.

Rien ne paraît plus simple que la loi de la chute des corps, la première que l'on enseigne à ceux qui abordent la physique. Dans le vide, les corps tombent en ligne droite, vers le centre de la Terre, avec une vitesse proportionnelle au temps de chute et en parcourant un espace proportionnel au carré de ce temps. Cet énoncé reste sensiblement exact pour la chute dans l'air, si la surface du corps n'est pas trop grande pour son poids, et si la hauteur de chute n'est pas telle que la vitesse devienne trop considérable. Nous pouvons donc l'appliquer à la chute d'un corps assez lourd, dans un laboratoire, c'est-à-dire d'une hauteur de un ou deux mètres.

Mais laissons tomber ce corps d'une hauteur plus considérable, disons 300 mètres pour fixer les idées : la loi ci-dessus sera manifestement insuffisante. Un corps qui tombe n'est pas soumis à la seule action de la masse terrestre, supposée concentrée au centre du globe. Les marées nous montrent combien sensible est l'action gravitative de la Lune et du Soleil ; et, selon la situation de ces astres dans le ciel, la chute, sur un parcours aussi long, est certainement influencée dans une proportion dont nous ne tiendrons pas compte, faute de savoir comment faire. Mais sans aller aussi loin, nous pouvons trouver d'autres éléments perturbateurs notables.

Dès le milieu du XVIII^{e} siècle, La Condamine et Bouguer ont étudié la déviation du fil à plomb au voisinage du Chimborazo ; auprès d'une montagne d'Ecosse, Maskelyne mesura une déviation de 11 secondes d'angle, qui représente un écart de 16 millimètres sur une chute de 300 mètres. D'autre part, la rotation de la Terre détermine une vitesse horizontale qui croît avec l'éloignement du centre ; le sommet de la tour Eiffel a, par rapport à la base, un excès de vitesse de 14 millimètres par seconde ; cela revient à dire que les choses se passent comme si un objet, abandonné de là-haut en chute libre, était lancé horizontalement avec une vitesse de 14 millimètres ; et comme la durée de chute est de 7 secondes et 8 dixièmes, il arrive à terre à 11 centimètres à l'Est du pied de la verticale, ce qui n'est pas négligeable.

Encore la durée de la chute qui vient d'être indiquée est-elle trop faible. Il faudrait tenir compte de la résistance de l'air, qui l'allonge, et aussi de ce que nous avons admis, pour l'accélération de la pesanteur, la valeur qu'elle a au niveau du sol, à Paris, alors que nous aurions dû prendre une valeur moindre et continûment croissante, ou au moins une valeur constante moyenne.

Finalement, on voit que la loi qui est valable à l'intérieur d'un laboratoire ne suffit déjà plus pour une chute de 300 mètres, qui ne saurait être qualifiée de très considérable ; et cet exemple nous montre combien l'énoncé de la loi d'un phénomène peut varier selon les circonstances de son application.

Théoriquement, une loi physique rattache un phénomène à une cause. Mais comme il n'existe pas de phénomène qui ne soit influencé par une multitude de causes, il se trouve qu'à l'application, chaque loi est contrariée par d'autres, suivant une proportion qui peut être insensible ou considérable.

Les lois, qui sont nécessairement simples, — car il faut bien qu'elles soient rédigées à l'échelle de notre entendement, sans quoi elles ne nous seraient d'aucun secours, — les lois n'ont donc, chacune, qu'un champ d'application limité.

5. — La relativité des grandeurs.

L'acuité de nos sens est limitée et ne nous permet de percevoir, et même de concevoir, que des dimensions assez peu différentes des nôtres. Déjà l'expression « un centième de millimètre » ne dit rien à notre imagination ; et pourtant, cette longueur, couramment employée dans la mécanique de précision, est énorme par rapport aux dimensions atomiques. Nous ne pouvons guère nous représenter que les longueurs comprises entre le dixième de millimètre, épaisseur d'un cheveu fin, et le trajet, réalisable en marchant, qu'un coup d'œil nous permet d'embrasser. Pour nous figurer la distance de deux villes, nous avons besoin d'une idée auxiliaire, celle de la durée du voyage. Quant aux distances astronomiques, qu'il s'agisse de celle du Soleil, soit 149 millions de kilomètres, franchie par la lumière en 8 minutes et un quart, ou de celles que les radiations mettent des siècles à parcourir, nous ne pouvons nous en faire aucune représentation précise.

De là, le fait que beaucoup de lois physiques nous sont masquées parce que nous sommes impuissants à en observer les effets ; et quand un de ces effets nous est révélé indirectement, nous sommes portés à nous imaginer que tout est changé, et d'aucuns s'écrient que l'édifice de la science a été renversé par une cartouche de dynamite.

Ainsi, Copernic nous a enseigné que la Terre est ronde, et la verticale, relative. Deux verticales voisines ne sont donc pas strictement parallèles, puisqu'elles concourent au centre de la Terre. Seulement, nous ne nous en apercevons pas.

On étonne bien des gens, par exemple, en leur disant que, quand ils marchent, leur tête parcourt plus de chemin que leurs pieds. Et pourtant, considérez un homme haut de 1 m, 75. Son corps prolonge un rayon terrestre. Si donc il fait le tour de la Terre, sa tête décrit un cercle dont le rayon est plus long de 1 m, 75 que celui du cercle parcouru par ses pieds ; et sur 40 millions de mètres, la différence est de 11 mètres. Si notre homme ne marchait qu'un kilomètre, la différence serait 40000 fois moindre, soit trois dixièmes de millimètres (exactement : 275 millièmes) ; sur un mètre de distance, la tête parcourt donc trois dix-millièmes de millimètres de plus que les pieds. Assurément, cette différence est insensible ; mais *elle existe*. Et il est d'autant plus nécessaire de le savoir, que, comme nous le verrons dans le cours de cette étude, une accumulation suffisante de minuties de ce genre finit par devenir sensible, et qu'il faut bien se rendre compte d'où elle provient ; tel est le cas pour les phénomènes de l'astronomie, de la géologie, de l'évolution. Au reste, les anciens disaient déjà : « La goutte d'eau excave le roc ». Bien mieux : à force de baiser le pied de la statue de saint Pierre, à Rome, les pèlerins ont fini par l'user ; imagine-t-on quelle épaisseur de bronze chacun d'eux a fait disparaître ?

Pour revenir à l'idée de verticale, on se rend bien compte que si deux tours de 300 mètres étaient élevées, l'une au pôle et l'autre à l'équateur, leurs axes seraient à angle droit, et que leurs sommets seraient sensiblement plus écartés que leurs bases ; en fait, la différence atteindrait 471 mètres. Mais élevons une seconde tour Eiffel à 300 mètres de la première, dans le jardin même du Champ-de-Mars ; leurs sommets divergeront de 14 millimètres, et personne ne s'en apercevra. De même, admettons que l'Arc de l'Étoile ait exactement 50 mètres de haut et autant de façade : ses faces opposées ne sont pas parallèles, mais leur divergence, au sommet, n'est que de quatre dixièmes de millimètre.

On voit que les architectes peuvent dédaigner l'enseignement de Copernic, et considérer la Terre comme plate. Mais il n'en est pas toujours de même pour les ingénieurs. Par exemple, la courbure de la terre est, en nombre rond, de 1 m, 25 par kilomètre ; je veux dire qu'à un kilomètre de distance, un canot dont la coque est haute de 1 m, 25 disparaît à la vue d'un observateur couché sur la plage. Si donc on construisait un pont de Calais à Douvres (distance, 32 kilomètres), et qu'on pût en tenir le tablier parfaitement plan, il serait, à l'arrivée, de 40 mètres plus élevé au-dessus du niveau de la mer, qu'au départ! Heureusement, la nature se charge de corriger notre travail : les ingénieurs, opérant avec le niveau d'eau, c'est-à-dire se réglant sur la verticale du lieu, auraient la conviction de construire un tablier plan, alors qu'ils réaliseraient automatiquement une zone sphérique. Et de même pour un long tunnel, qui n'est pas un cylindre, mais un tore.

De tout cela il résulte qu'il n'existe pas de quantités absolument grandes ou petites. Chaque quantité est grande ou petite, selon l'unité à laquelle on la rapporte, selon l'échelle à laquelle il convient d'opérer. Elles sont donc toutes de même importance, toutes « égales en droit », peut-on dire, vis-à-vis des lois naturelles. La question est de savoir, dans chaque cas particulier, à quel point il est nécessaire de pousser l'approximation d'une mesure, combien de zéros ou de décimales il convient d'écrire à la suite d'un nombre. Ainsi, toute quantité peut être considérée d'un point de vue tel, qu'elle soit, à volonté, primordiale ou négligeable : la notion de grandeur est essentiellement relative.

6. — L'espace et le temps, en physique. Les repères.

J'ai écrit plus haut les mots espace (ou longueur), temps, masse, mouvement. Avant de poursuivre, nous sommes obligés à quelques précautions, sous peine de nous égarer. Parlons d'abord, ici, de l'espace et du temps.

Il doit être bien entendu que nous nous abstiendrons de toute incursion dans la métaphysique à propos de ces concepts. Le physicien ne se demande pas « ce qu'est » le temps, l'espace ou le reste ; l'essence des choses, leur cause première et leur cause finale sont en dehors de l'objet de ses recherches, comme l'indique le nom même de la *méta-physique*. Pour qu'un objet l'intéresse, en tant que physicien, il faut et il suffit que cet objet soit *mesurable*, c'est-à-dire qu'on ait défini ce que signifient, appliqués à lui, les termes « une fois, deux fois », etc., et que l'on possède un instrument permettant de mesurer l'unité de cet objet, ses multiples et ses sous-multiples.

C'est ainsi qu'un physicien se contentera de ces définitions, que j'ai données ailleurs, et qui sont de nature à faire hurler un métaphysicien :

L'espace est la grandeur qu'on est convenu de mesurer, suivant trois directions perpendiculaires deux à deux, au moyen de règles dont le prototype est le mètre international;

Le temps est la grandeur qu'on est convenu de mesurer au moyen d'horloges réglées astronomiquement sur le jour moyen.

Nous parlerons plus loin du mouvement et de la masse.

* * *

Cela posé, il est nécessaire de noter comment on définit géométriquement la situation d'un point P dans l'espace.

Il suffit pour cela de choisir trois plans de repère (*fig.* 1), dont chacun soit perpendiculaire aux deux autres, et de mesurer les distances PA, PB et PC du point P à chacun d'eux ; ces distances seront exprimées par des nombres, que l'on est convenu de faire précéder de l'un des signes + ou — pour indiquer de quel côté du plan le point se trouve (à gauche ou à droite du plan A, en avant ou en arrière du plan B, au-dessus ou au-dessous du plan C).

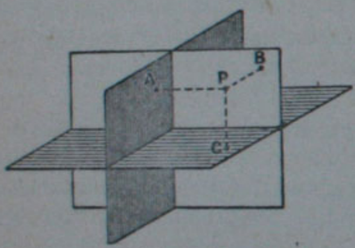


Figure 1.

Considérons par exemple le plancher d'une chambre et deux de ses murs contigus. Nous connaîtrons la situation d'un point quelconque, intérieur ou extérieur à la chambre, quand nous saurons à quelle distance il se trouve (du côté + ou du côté —) du premier mur (longueur), du second (largeur) et du plancher (hauteur). Ces nombres sont ses *cotes* ou *coordonnées*, par rapport aux trois *plans de coordonnées;* et l'ensemble de ces trois plans est ce que nous appellerons, par la suite, le *système de repère* ou, plus simplement, les *repères*.

On remarquera que le coin où se rencontrent les trois murs présente cette particularité d'être sur tous trois à la fois, c'est-à-dire que ses trois coordonnées sont nulles. On le nomme l'*origine des coordonnées*.

Notons encore que le choix des repères est entièrement libre. Je peux évidemment déterminer la position du sommet d'un clocher par rapport à trois parois prises dans une chambre quelconque, à une altitude quelconque, et suivant une orientation quelconque : le tout est que nous sachions toujours quels sont les repères employés pour l'étude d'une question donnée.

En outre, nous pouvons avoir avantage, au cours d'un problème, à changer de repères. Cela revient simplement à modifier d'une manière uniforme les trois cotes de chaque point, mais cela ne change évidemment pas plus la forme des figures qu'on ne les change en regardant un dessin de plus ou moins près, ou en le faisant tourner devant soi.

On voit, en résumé, que, les repères étant donnés, un point quelconque de l'espace est représenté par trois nombres, précédés chacun du signe + ou du signe —, selon que le point est d'un côté ou de l'autre du plan auquel se rapporte ce nombre. Pour éviter toute confusion, on désigne ces trois plans par trois lettres qui ont malheureusement le don d'épouvanter les profanes : on les appelle plan des x, plan des y et plan des z, et les trois nombres qui s'y rapportent sont l'x, l'y et le z du point. Un point situé sur le plancher même est caractérisé par le fait que son z est nul, son x et son y étant quelconques.

7. — Les mesures et la coïncidence.

Mais qu'est-ce que mesurer une grandeur ? — C'est la comparer à l'unité qu'on a choisie à cet effet. — Et comment s'effectue cette comparaison ? — Par une constatation de coïncidences. — Et qu'est-ce enfin que cette opération ? — La constatation de notre impuissance à percevoir certains écarts.

Soit en effet à mesurer une longueur. Nous prendrons une règle d'un mètre, et nous la poserons le long de l'objet à mesurer. Si, en tenant compte des corrections nécessaires, comme celle de la dilatation causée par la température, nous constatons qu'un point de l'objet est en face du trait zéro de la règle, et un autre en regard du dernier trait, nous disons que la distance de ces points est de 1 mètre.

Mais ces coïncidences ne sont réalisées que dans une certaine limite, sous bénéfice d'inventaire. Bien entendu, nous employons le vernier et le microscope; mais ces instruments sont perfectibles, aussi bien que la règle elle-même, dont les traits ont une épaisseur qui nuit à la précision. Un progrès de l'outillage, ou bien l'emploi d'un autre mode opératoire, pourra nous révéler un certain écart où nous avons déclaré d'abord qu'il y a coïncidence. Alors que Delambre, un des créateurs du système métrique, considérait, il y a cent ans, le centième de millimètre comme la limite inférieure de la longueur mesurable, nous disposons de méthodes optiques qui permettent d'apprécier, non seulement le *micron*, ou millième de millimètre, non seulement le millième du micron, ou *millimicron*, mais le millième de ce dernier, soit le milliardième de millimètre!

Ainsi, nous appelons « point » ce à quoi nous ne pouvons pas attribuer de dimension perceptible ; et nous disons que deux points coïncident, quand ils sont si rapprochés, que nos moyens d'observation ne nous permettent pas de les dissocier, quitte à ce que, plus tard, ils apparaissent à nos successeurs comme deux volumes séparés par un large espace. Autrement dit, *la coïncidence consiste, pour nous, en l'évanouissement de tout écart qui nous soit sensible.* Toute évaluation de longueur doit être précisée par l'indication de l'approximation avec laquelle on l'a effectuée, et dans les limites de laquelle elle est perfectible ; elle doit faire ressortir l'étendue de notre impuissance actuelle.

Il en est de même, bien entendu, de toute autre mesure. Pour prendre seulement le cas du temps, ses mesures se ramènent à observer le passage d'une aiguille devant les divisions d'un cadran. Ici encore, il s'agit d'une coïncidence, mais la chose est compliquée par l'intervention du mouvement: un instant avant celui à considérer, l'aiguille était à gauche d'un certain point du cadran; un instant après, elle a passé à sa droite; et la question et de savoir quand elle « coïncidait » avec lui.

On pourrait croire que c'est en raison de cette incertitude de la coïncidence que l'idée des quantités physiques est relative; mais il n'en est rien. Il s'agit simplement, ici, de la constatation de ce fait que nos moyens d'observation ne nous permettent, à chaque époque, qu'une approximation donnée. Mais dans les limites de cette approximation, l'idée d'une longueur, par exemple, est bien définie. Ainsi, le parcours de la lumière dans le vide est de 300 000 kilomètres par seconde, à 400 kilomètres près, en plus ou en moins: *nous savons donc* qu'il est compris entre 299 600 et 300 400 kilomètres. De même la distance de la Terre au Soleil est de 149 millions de kilomètres, à 1/16 000, soit à 9 300 kilomètres près. Un progrès de la science permettra de réduire ces approximations, de « resserrer ces fourchettes », comme dirait un artilleur; mais telles que nous les énonçons, elles répondent à l'idée de quantités bien définies, auxquelles tout observateur, employant le même mode opératoire et les mêmes instruments, attribuerait la même valeur.

Si l'on analysait jusqu'au bout notre incertitude concernant les coïncidences, on pourrait encore observer ce qui suit. On tend actuellement à se représenter les atomes comme des sortes de systèmes planétaires, composés chacun d'un soleil minuscule, autour duquel tournent vertigineusement des planètes, au nombre de 2 à 72, selon l'élément chimique considéré. Une table de marbre ou d'acier ne nous paraît rigide qu'en raison de la vitesse de ces corpuscules, comme ces jets d'eau très rapides qu'il est impossible de trancher d'un coup de sabre. Dans ces conditions, où situer les bouts et les divisions de la règle la plus rigide? Pour un être capable de percevoir les atomes, la règle entière se présenterait comme un essaim d'innombrables moucherons, à quoi l'on serait bien embarrassé d'assigner des dimensions déterminées. Mais il est clair que cette considération n'est pas à notre échelle, et que d'ailleurs elle n'introduirait dans les mesures que des incertitudes bien inférieures à celles qui viennent d'être indiquées. Ce n'est pas encore là qu'est la théorie de la relativité.

8. — La durée et l'instant.

Des confusions résultent souvent de ce qu'on est habitué à se servir du mot « temps » sans en spécifier le sens. Il exprime en effet deux idées bien distinctes. La première est celle de la « durée », c'est-à-dire d'une succession, d'un intervalle, dont la connaissance est un effet de notre mémoire, de notre notion de la persistance du Moi. Nous nous souvenons d'avoir constaté un fait ou un état ; puis nous en constatons un nouveau, tout en ayant la conscience (d'ailleurs, illusoire) de n'avoir pas changé nous-mêmes ; et, par comparaison avec d'autres phénomènes concomitants, nous évaluons la « durée » plus ou moins longue de l'événement. Nous disons, par exemple : le voyage a duré deux heures.

Quant à l' « instant » ou « époque », il est à la durée ce qu'un point est à une ligne; c'est une durée infiniment courte, c'est-à-dire, pratiquement, une durée si courte que nous ne sommes pas capables de lui attribuer une valeur.

On indique un instant en disant quelle durée s'est écoulée jusqu'à lui, à partir d'un autre instant, pris comme origine. Par exemple, on dira que le train est parti à six heures, c'est-à-dire qu'à l'instant du départ il s'était écoulé six heures depuis minuit.

D'autre part, une durée quelconque se présente comme la différence entre les durées qui déterminent son instant final et son instant initial : dans l'exemple ci-dessus, la durée du voyage, soit deux heures, est la différence entre celles qui définissent l'instant de l'arrivée (huit heures après minuit) et celui du départ (six heures après minuit).

On voit, en résumé, que le mot « heure » répond à deux idées différentes, quand nous disons « il est deux heures » ou « cela durera deux heures ».

9. — Le mouvement.

L'idée du mouvement, comme celles de l'espace et du temps, tracasse beaucoup les métaphysiciens, qui veulent absolument savoir ce qu'est le « mouvement en soi », le « mouvement absolu ».

Ces deux termes n'ont aucune signification pour le physicien, qui ne connaît que le *mouvement relatif*, c'est-à-dire celui d'un corps par rapport à un autre. Nous savons en effet que les sciences physiques ne traitent que des quantités mesurables ; et, à ce titre, le mouvement ne peut se concevoir que comme l'exécution d'un changement de position, défini par une série de mesures simultanées d'espace et de temps ; l'idée de mouvement implique donc celle de repères, servant à déterminer les positions successives du mobile, et par rapport auxquels le mouvement est donc relatif. Ces repères, nous sommes bien obligés de les considérer comme fixes, pour l'objet que nous avons en vue ; mais nous savons qu'ils sont en mouvement par rapport à d'autres corps.

Voici par exemple un train qui roule. Nous étudions son mouvement d'ensemble par rapport à la voie, supposée fixe ; les soubresauts d'un wagon, par rapport à un autre, supposé au repos ; la promenade d'un voyageur dans le couloir, par rapport au plancher, supposé fixe ; la circulation des globules du sang de ce voyageur, par rapport à son corps, supposé immobile. Mais nous savons que la voie n'est nullement immobile par rapport à la Terre ; que celle-ci est animée de nombreux mouvements, dont sa révolution et sa rotation ne sont que les plus sensibles ; qu'elle accompagne le Soleil dans son voyage à travers notre petit système stellaire, etc. Dans tout cela, il n'existe d'autres points au repos que ceux que nous convenons de considérer comme tels, pour l'étude d'un déplacement déterminé.

Autrement dit, quand nous voulons étudier un déplacement à l'intérieur d'un système, nous choisissons, dans ce système, des repères qui ne participent pas à ce mouvement, et que nous pouvons donc considérer comme fixes, pour ce problème particulier. Ce seront par exemple, dans le cas d'un mouvement exécuté à l'intérieur d'un wagon, trois plans liés à ce wagon ; peu nous importe que celui-ci soit, ou non, en mouvement sur la voie.

D'autre part, on peut étudier le mouvement d'un mobile par rapport à un autre mobile, par l'intermédiaire d'un système de repères supposé au repos ; c'est une affaire d'addition ou de soustraction, ou, comme on dit, de *composition* de mouvements. Par exemple, connaissant la marche de divers trains par rapport au kilomètre zéro de la voie, ou par rapport à une certaine gare, ou même par rapport à un train considéré comme au repos, on en déduit le mouvement relatif de deux quelconques d'entre eux.

Ainsi, tout mouvement est relatif. Pour le définir et l'étudier, nous sommes obligés de supposer que certains repères sont fixes ; mais c'est là une simple convention : tenons compte du déplacement de ces repères par rapport à d'autres, et le mouvement sera considéré comme relatif à ceux-ci, auxquels nous aurions pu le rapporter directement, et il sera défini différemment.

***

Je suis obligé ici de faire appel à la patience du lecteur, qui vient déjà d'être mise à l'épreuve. Les considérations qui suivent pourront paraître un peu minutieuses. Mais elles n'exigent aucune connaissance scientifique : simplement, un peu d'attention. Et d'autre part, il est indispensable d'avoir des idées bien nettes sur ces points, qui sont les fondements de la théorie de la relativité.

Un mouvement est défini quand on en connaît à chaque instant la *direction* et la *vitesse ;* selon qu'elles sont invariables, ou non, le mouvement est dit *uniforme* ou *varié*.

Par exemple un véhicule qui glisse en ligne droite, sans heurt ni saccade, en parcourant toujours le même nombre de mètres par seconde, est à l'état de mouvement uniforme ;

Un corps qui tombe dans le vide parcourt également une droite, mais sa vitesse croît en proportion de la durée de sa chute ; son mouvement est varié (rectiligne et uniformément accéléré) ;

La pointe de l'aiguille d'une montre décrit un cercle, avec une vitesse constante ; encore un mouvement varié, mais seulement en direction ;

Enfin une planète, supposée soumise seulement à la gravitation vers son soleil, décrit une ellipse avec une vitesse variable ; son mouvement est varié en direction et en vitesse.

Le mouvement uniforme est celui qui nous intéresse le plus ici, pour sa simplicité, et parce que tout autre mouvement peut être considéré comme tel, pendant une durée suffisamment courte pour que ses variations soient insensibles : celui de la Terre elle-même, si complexe soit-il, peut être admis uniforme pendant le trois-centième de seconde qu'il faut à un signal électrique pour aller de Brest à Toulon. C'est d'ailleurs au mouvement uniforme que se rapporte la première théorie d'Einstein ; et cela nous oblige à préciser un peu nos idées à son sujet.

Avant d'aller plus loin, convenons que, dans tout ce qui suivra, nous appellerons *système* un ensemble de points ou de corps *participant à un même état de mouvement*. Par exemple, la Terre constitue un système par rapport à la Lune. Un train en marche et un autre à l'arrêt, ou bien le train en marche et la voie, sont deux systèmes à l'état de mouvement relatif. De même, deux trains qui ont des vitesses ou des directions différentes ; nous rapportons leurs mouvements à la voie, mais nous sommes libres de prendre un des trains pour repère du mouvement de l'autre : nous dirons à volonté que le train A va vers une station à la vitesse de 80 kilomètres par heure et que le train B, qui a dépassé la station, s'en éloigne à raison de 60 km/h, ou qu'ils vont à la rencontre l'un de l'autre à la vitesse de 20 km/h, ou que A va vers B, ou B vers A.

Deux trains qui courent parallèlement et avec une même vitesse font partie d'un même système. De même, deux trains arrêtés, ou bien un train arrêté et la voie.

On peut d'ailleurs observer des mouvements à l'intérieur d'un système. Un voyageur fait partie du système train, il participe à sa vitesse ; mais s'il se promène dans le couloir, la vitesse de sa marche, sa vitesse propre, s'ajoute à celle du système, ou s'en retranche, selon le sens de son parcours ; par rapport à la voie, il va plus vite ou moins vite que le train.

Enfin, pour bien marquer ce fait que, quand il y a mouvement, c'est-à-dire quand la position relative de deux systèmes se modifie, on est toujours libre de choisir l'un quelconque des deux systèmes comme repère supposé immobile, j'emploierai par la suite l'artifice suivant. Je m'adresserai directement au lecteur, en supposant que je sois au repos, et que le lecteur soit (c'est-à-dire que *vous soyez*) dans un système en mouvement. En lisant le texte, vous vous appliquerez naturellement le mot *je*, et vous appliquerez à un auditeur imaginaire, ou bien à moi-même, le mot *vous*. De cette manière, vous vous pénétrerez bien de cette idée que les notions de mouvement et d'immobilité sont relatives, puisqu'elles se trouveront interchangeables, et passeront à volonté d'un personnage à l'autre.

10. — Le principe de Galilée.

Chacun sait par expérience personnelle que, quand on est assis, les yeux fermés, dans un train qui a démarré tout doucement sur une voie bien unie, rien ne révèle que l'on soit en route. Si l'on ouvre les yeux et qu'on aperçoive un autre train sur une voie parallèle, on a peine à discerner lequel des deux est en marche, ou s'ils n'y sont pas tous les deux ; on n'y parvient qu'à la faveur de quelque renseignement accessoire, tel qu'une secousse, un bruit, ou la vue d'un repère auquel on ne peut pas attribuer de déplacement, tel qu'un édifice ou un poteau télégraphique.

D'autre part, tant que notre wagon est en mouvement uniforme, nous y exécutons tous nos gestes et tous les phénomènes s'y passent comme s'il était à l'arrêt. Laissons tomber un objet d'une hauteur d'un mètre, et sa chute s'accomplira en ligne droite, verticalement, en 45 centièmes de seconde, comme au laboratoire. Suivons du regard une mouche : elle vole ou se promène au plafond, sans être influencée par la vitesse du train.

Par contre, chacun sait aussi qu'il n'en est pas de même quand la vitesse vient à varier, par accélération ou par freinage. En pareil cas, nous avons peine à garder notre équilibre ; et si la variation est assez brusque, un objet déposé dans le filet du wagon peut en être projeté ; et il ne tombera pas verticalement, mais suivant une courbe. De même en cas de changement de direction : on sait comment, dans un tournant, on est chassé vers l'extérieur par une « force centrifuge » qui peut aller jusqu'à faire déraper une automobile ou dérailler un train.

Ce qui vient d'être dit du mouvement uniforme est condensé en une loi, due à Galilée, et qui constitue un des principes fondamentaux de la mécanique. On peut en donner plusieurs énoncés différents, qui font ressortir divers aspects de la question. Celui qui traduit directement les observations ci-dessus est le suivant :

A. — *Dans un système à l'état de mouvement uniforme, toute force imprime à un corps le même mouvement que si le système était au repos.*

Cela revient à dire que les choses se passent de même dans deux systèmes qui sont, l'un par rapport à l'autre, en mouvement relatif uniforme. D'où les rédactions suivantes, données par Einstein, et dont on est libre de choisir l'une ou l'autre, selon la question que l'on traite.

B. — *Les lois physiques sont exprimées de la même manière, quand on les rapporte à des systèmes de repère qui sont à l'état de translation relative uniforme ;*

C. — *Les lois physiques sont les mêmes pour des observateurs qui sont, l'un par rapport à l'autre, à l'état de translation relative uniforme ;*

D. — *Les lois physiques doivent pouvoir être formulées de* *telle sorte que, de leur vérification expérimentale, on ne puisse rien déduire concernant l'état de translation uniforme de l'observateur.*

Il faut se garder ici d'une confusion dans laquelle on tomberait facilement : ce qui précède s'applique aux lois naturelles, telles que les formule un observateur *dans son système*, c'est-à-dire *en rapportant ses mesures à des repères choisis dans son système*, ou autrement dit, *à des repères immobiles par rapport à lui*. Autrement, on arrive à des conclusions opposées.

Par exemple, me trouvant à terre, je laisse tomber un objet, et je vérifie les lois connues de la chute libre des corps. Vous, dans votre train en marche, vous en faites autant. Vous constatez, comme moi, que la chute est verticale, avec vitesse uniformément accélérée.

Maintenant, opérez de manière que je voie votre expérience : laissez tomber l'objet par la fenêtre du wagon. Dans votre système, c'est-à-dire en rapportant la trajectoire à la paroi du wagon, vous verrez toujours la chute verticale. Mais pour moi, qui la rapporte au sol, je verrai l'objet quitter votre main horizontalement, avec la vitesse du train, qui est sa vitesse acquise, puis décrire une parabole, et tomber en avant du point de l'espace où vous l'avez lâché. Rapportant ce phénomène de votre système à des repères pris dans le mien, je le décrirai tout autrement que vous ; et un observateur situé dans un troisième système, par exemple dans un bateau ou dans la lune, attribuerait au mobile une trajectoire toute différente.

De même, supposons que je laisse tomber un objet dont nous rapporterons le mouvement, non au sol, c'est-à-dire à mon système, mais à votre système, à votre train en marche ; ce sera, par exemple, une éponge imbibée de couleur, que je lâcherai de manière qu'elle effleure, au passage, la paroi de votre wagon. Pour moi, c'est-à-dire par rapport au sol dont je suis solidaire, elle tombera en ligne droite. Mais, dans votre système, elle tracera une parabole sur la paroi du wagon.

On voit par là que, si l'on se borne à dire qu'un point parcourt une droite, ou bien une courbe quelconque, on émet un énoncé incomplet, imprécis, et qui, à proprement parler, ne signifie rien : il faut toujours spécifier par rapport à quels repères une trajectoire est définie. L'idée d'un parcours quelconque, dans l'espace, est relative : autant il y a d'observateurs, dans des états différents de mouvement, pour étudier une trajectoire, et autant elle reçoit de descriptions différentes, également légitimes (1).

---

(1) Il convient de noter ici que le principe de Galilée est appelé *principe du mouvement relatif* dans nos traités de mécanique, et *principe de relativité* en Allemagne. C'est de ce dernier nom que vient celui de la « théorie de la relativité », et nullement de la notion générale de la relativité de toutes nos connaissances, ainsi que la plupart des auteurs le croient.

Lorsque Einstein élargit, en 1905, le principe de Galilée, il conserva à son nouvel énoncé le nom de *principe de relativité*, et le distingua du prédédent en appelant celui-ci le *principe classique de relativité*. Puis, en 1916, il opéra une nouvelle généralisation, et énonça le *principe généralisé de relativité*, en réservant au précédent le nom de *principe particulier*, ou *restreint*.

Ainsi, l'étude du mouvement relatif a été accomplie en trois étapes : le principe classique de Galilée, et les deux principes, particulier ou restreint et généralisé d'Einstein. Et, si ce dernier avait été un écrivain de langue française, les trois lois porteraient les noms suivants, plus explicites, et empêchant toute confusion avec les dissertations métaphysiques sur le relativisme de la connaissance :

Principe élémentaire du mouvement relatif uniforme (Galilée) ;
Principe complet (ou *développé*) *du mouvement relatif uniforme* (Einstein) ;
Principe du mouvement relatif varié (Einstein).

CHAPITRE II

LA RELATIVITÉ PARTICULIÈRE, OU RESTREINTE

11. — La loi de Michelson.

Réglons une fronde de manière qu'elle lance une balle en lui imprimant au départ la vitesse de 10 mètres par seconde. Montons ensuite dans une voiture qui roule à la vitesse du trot, soit 7 mètres par seconde ; et lançons avec notre fronde deux balles, l'une vers l'avant, et l'autre vers l'arrière. Un enfant nous dira qu'elles ont toutes deux, par rapport à la voiture, la vitesse de 10 mètres, mais qu'elles participent à son mouvement, qu'elles ont, avant d'être lancées, une « vitesse acquise » de 7 mètres, et que leurs vitesses au départ, relativement au sol, seront donc respectivement de 17 et de 3 mètres.

Mais, dans cet ordre d'idées, le phénomène de l'aberration, découvert par Bradley en 1725, a soulevé une question troublante. Il consiste en ce que, quand on observe une étoile, la direction de la lunette ne coïncide pas avec la droite qui joint notre œil à cette étoile.

Bradley l'expliqua de la manière suivante. La lunette, qui participe au mouvement de la Terre, se dérobe devant le rayon lumineux, qui la parcourt en continuant de suivre sa direction primitive. Si donc elle était pointée dans cette direction, le rayon entré par le centre de l'objectif ne tomberait pas au centre de l'oculaire, qui aurait coulissé devant lui ; son parcours se trouverait oblique par rapport à l'axe de la lunette ; d'où il suit que, pour observer l'étoile, il faut braquer la lunette un peu en avant d'elle dans le sens du mouvement terrestre.

C'est ce que montre la figure 2, où, pour plus de simplicité, la lunette a été remplacée par une boîte cylindrique ABCD, percée, suivant son axe, de deux petits trous M et N. Si la lunette, immobile, est pointée sur l'étoile E, le rayon EM suit son axe et vient tomber en N. Mais si elle se déplace dans le sens de la flèche F pour venir en A′B′C′D′ pendant le temps que le rayon met à la traverser, ce rayon

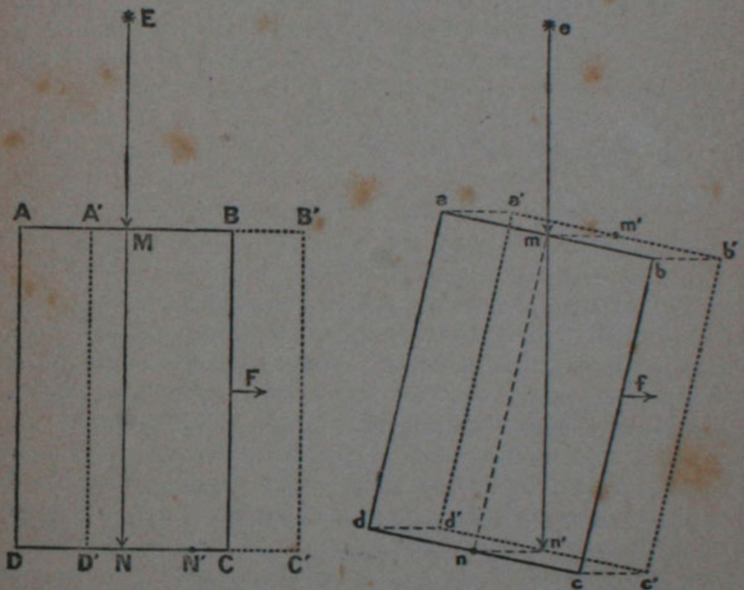


Figure 2.

tombe toujours en N, mais n'y rencontre pas le second trou, qui est venu en N′. Si enfin la lunette a été pointée obliquement par rapport à la direction de l'étoile, comme le montre la seconde partie de la figure, ses positions successives sont *abcd* et *a′b′c′d′*, le rayon entré en *m* sort en *n′*, et l'on aperçoit l'étoile. L'angle *nmn′* est appelé l'angle d'aberration (nous reviendrons sur ce phénomène au § 16).

Ainsi, tandis que la vitesse de la lumière varie selon la nature du milieu traversé, ce raisonnement implique qu'elle est indépendante du mouvement relatif de la source lumineuse (l'étoile) et du milieu (la portion d'atmosphère contenue dans la lunette). Cela méritait une vérification attentive.

En 1820, Fresnel trouva, au contraire, que la vitesse de la source s'ajoute à celle de la lumière (ou s'en retranche, selon le sens du mouvement relatif), mais seulement dans une certaine proportion, qu'on appelle le *coefficient d'entraînement de Fresnel*. Ainsi, la lumière, seule parmi tous les phénomènes connus, n'obéirait que partiellement à la loi du mouvement relatif.

En 1851, une expérience toute différente, exécutée par Fizeau, confirma ce résultat, qui sembla donc définitivement acquis.

Mais en 1881, l'Américain Michelson, opérant d'une troisième manière, différente des deux précédentes, aboutit à une conclusion tout autre : la vitesse de la lumière par rapport à un mobile fut trouvée constante, en quelque direction qu'on la considérât. Autrement dit, la propagation de la lumière est entièrement indépendante du mouvement relatif. C'est ce qu'on appelle la *loi d'égale propagation de la lumière dans toutes les directions*, ou plus brièvement la *loi d'isotropie* de la lumière. Pour éviter à la fois les longueurs et un mot peu familier, je l'appellerai la *loi de Michelson*.

Les trois expériences avaient été exécutées avec le plus grand soin, et furent répétées par des opérateurs différents. Chacune d'elles, considérée isolément, était donc inattaquable; et elles conduisaient à des conclusions discordantes, et contradictoires avec une loi à laquelle obéissent tous les phénomènes connus ! Il y avait là une énigme intolérable, qui ne fut résolue qu'au bout de vingt-quatre ans, par la théorie de la relativité d'Einstein.

Le Hollandais Lorentz avait bien émis à ce sujet une idée que l'Écossais Fitz Gerald avait déjà entrevue avant lui, et qui semble effarante ; c'est que, quand un corps est en mouvement par rapport à un autre, les longueurs s'y trouvent contractées, et les durées y sont allongées dans certaines proportions ; moyennant quoi, le résultat trouvé par

Michelson devenait explicable. Seulement, il était impossible de vérifier cette assertion ; car si, par exemple, notre laboratoire est raccourci dans le sens de la translation de la Terre autour du Soleil, le mètre que nous employons pour le mesurer se trouve contracté dans la même proportion et ne peut donc pas nous révéler cette variation. La contraction lorentzienne se présentait donc comme une supposition arbitraire, forgée de toutes pièces pour expliquer un fait anormal ; c'était ce qu'on appelle familièrement un « coup de pouce » donné aux calculs de Michelson, et elle fut naturellement accueillie avec scepticisme.

Il était réservé à Einstein de la confirmer par un raisonnement déduit d'une théorie générale, exclusive de toute hypothèse arbitraire, et de montrer ainsi, d'une manière inattaquable, que la contradiction signalée plus haut n'était qu'apparente. Elle tenait simplement à ce que Fresnel et Fizeau mesuraient la vitesse de la lumière par rapport à des repères participant au mouvement du milieu parcouru, tandis que Michelson la rapportait, ainsi qu'avait fait Bradley, à des repères immobiles dans son laboratoire. Les choses se passaient donc comme si les deux premiers expérimentateurs avaient été en mouvement par rapport au troisième ; et en apportant à leurs calculs les corrections nécessaires pour tenir compte de ce fait, Einstein a mis leurs résultats d'accord. On peut dire que le dispositif de Michelson était le plus naturel, en ce qu'il ne compliquait pas la question par l'intervention inutile d'une vitesse relative ; et c'est pourquoi Einstein a bien fait de s'appuyer plutôt sur cette expérience.

12. — Le principe particulier de relativité.

Voici quel est, en substance, le raisonnement d'Einstein.

L'expérience nous oblige à admettre :

1° *la loi de Galilée :* Dans un système en état de translation uniforme, toute force agit comme si le système était au repos (donc, si j'observe un mobile à l'intérieur d'un pareil système, sa vitesse, par rapport à moi, est la résultante de la vitesse relative du système et de la vitesse que ce mobile a dans le système, et qu'il aurait également si le système était au repos) ;

Et 2° *la loi de Michelson*, qui assigne à la lumière une situation privilégiée, en disant : La lumière se propage en tous sens avec la même vitesse, quel que soit l'état de translation de la source par rapport au milieu traversé (donc, si je mesure la vitesse de la lumière dans un milieu à l'état de translation uniforme, je lui trouve la même valeur que dans mon milieu ; elle est indépendante de la vitesse relative).

Fondons ces deux lois en une seule, le *principe particulier de relativité;* et quand nous observerons un phénomène qui se passe dans un système à l'état de translation uniforme par rapport au nôtre, nous arriverons, tous calculs faits, à cette conséquence, que les dimensions des corps dits « rigides », ainsi que la marche des horloges, sont trouvées différentes, selon que les repères auxquels on les rapporte sont solidaires, ou non, de leur état de mouvement.

Ce fait lève la contradiction qui semblait exister entre la propagation de la lumière et la loi de Galilée ; il explique aussi la discordance qui existe entre les résultats des expériences de Fresnel et de Fizeau, d'une part, et de Michelson, de l'autre, expériences également correctes, mais exécutées dans des conditions différentes de mouvement relatif, et dont la dernière confirme le raisonnement de Bradley.

Seulement, les variations ainsi démontrées sont insensibles quand on opère aux faibles vitesses relatives que nous pouvons réaliser par des moyens mécaniques. Elles ne sont vérifiables qu'avec des vitesses de l'ordre de grandeur de celle de la lumière, par exemple celle des particules émises par les corps radio-actifs, ou bien avec les vitesses des astres agissant pendant un temps suffisant (car ces dernières sont plus voisines de nos vitesses mécaniques que de celles de la lumière).

En résumé, les désaccords signalés plus haut tenaient à ce qu'on admettait jusqu'ici, comme vérités allant de soi, que les dimensions des corps rigides et la marche des horloges sont indépendantes de leur état de mouvement ; et on l'admettait parce que, dans la pratique courante, les variations échappent à l'observation. Aujourd'hui, on sait que cette hypothèse, sur laquelle reposent toutes nos théories, est erronée. Cela ne signifie pas, d'ailleurs, que tous les travaux exécutés jusqu'ici soient vains et méprisables ; ils restent pratiquement exacts, puisque leur inexactitude ne nous est pas sensible. La mécanique classique reste valable à notre échelle ; mais à une échelle supérieure, par exemple à l'échelle astronomique, elle a besoin d'être modifiée.

Nous allons éclaircir maintenant cet exposé sommaire et quelque peu aride.

13. — La notion de simultanéité.

Nous croyons énoncer une idée fort simple quand nous disons que deux événements sont simultanés. Et en fait, cette idée est intuitive quand les événements se produisent en un même lieu. Par exemple, nous voyons deux phénomènes tout auprès de nous, ou bien nous entendons deux bruits, ou encore nous percevons un bruit pendant que nous observons la marche de l'horloge ; nous disons que les deux faits sont simultanés, si l'intervalle de temps qui s'écoule entre eux est inappréciable par les moyens d'observation dont nous disposons ; et cet énoncé éveille une idée très nette dans tous les esprits.

Mais comment faut-il entendre cette phrase : « Deux opérateurs, situés l'un à Paris et l'autre à Tombouctou, feront un certain geste au même instant » ? — On répondra qu'il suffit que nos deux hommes soient munis de chronomètres bien réglés, et conviennent de l'heure où ils opéreront, en tenant compte, bien entendu, de la différence des longitudes, c'est-à-dire des « heures locales ». D'accord. Mais encore faut-il qu'ils soient certains que leurs montres marchent de la même manière ; et pour s'en assurer, ce serait tourner dans un cercle vicieux que de régler chacune d'elles sur la longitude du lieu, car la longitude a été déterminée par la différence des heures, avec une montre supposée bien réglée. Il n'y a d'autre ressource que d'échanger, à des heures convenues, des signaux dont on connaisse exactement la vitesse de propagation.

La lumière (ou, ce qui revient au même, l'électricité) est indiquée à cet effet, parce que sa vitesse de propagation est connue, et d'ailleurs pratiquement infinie sur Terre, et, surtout, que cette vitesse est la même en toutes directions (1). Finalement, l'idée d'employer des montres pour définir la simultanéité à distance nous ramène donc à celle d'envoyer des signaux simultanés ; pour ne pas tourner en rond, il faut que nous trouvions une définition directe.

Voici comment Einstein y a réussi.

Soit à vérifier la marche de deux montres situées en deux points A et B (*fig.* 3). Je me place en M, exactement

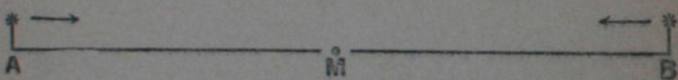


Figure 3.

au milieu de la distance AB ; et j'ai devant moi un miroir à deux pans formant angle droit, le miroir étant disposé de manière que j'y aperçoive à la fois les deux points A et B. En ces points sont deux opérateurs qui devront m'expédier, chacun, un éclat de lumière, à l'instant où sa montre marquera une heure convenue. Les distances AM et BM étant égales, et la lumière ayant la même vitesse dans les deux sens (loi de Michelson), les deux signaux mettront le même temps à me parvenir. Si donc je les aperçois en même temps sur mon miroir, j'aurai le droit de dire qu'ils ont été émis simultanément, et que les deux montres marquaient la même heure en même temps. Il va de soi que, pour nous assurer que cette coïncidence n'est pas fortuite, et que les montres ont bien la même marche, nous devrons procéder périodiquement à cette vérification.

(1) [Voir la note finale, page 157].

14. — La simultanéité est relative.

Cela posé, voici à quelle conclusion inattendue nous sommes conduits.

Je suppose (*fig.* 4) que vous soyez en V, dans un système mobile par rapport au sol, sur lequel je me trouve ainsi que les opérateurs A et B. Ce pourra être un train de chemin de fer, un ballon, ou une planète, peu importe ; l'essentiel est que, pour rester dans le cas du principe de Galilée (relativité classique), votre mouvement soit rectiligne et uniforme ; et nous le supposerons parallèle à la direction AB.

Recommençons maintenant l'expérience précédente, pour laquelle vous serez muni d'un miroir semblable au mien ; et supposons les choses arrangées de telle sorte que vous

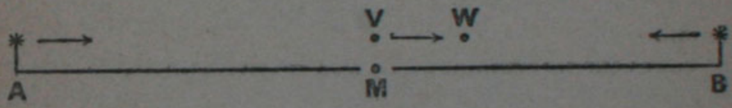


Figure 4.

vous trouviez exactement à ma hauteur, à l'instant, défini comme plus haut, où les signaux seront lancés, et que vous soyez donc, comme moi, à égale distance de leurs points de départ.

Ainsi qu'il a été dit plus haut, si les montres des deux opérateurs vont correctement et marquent la même heure au départ des deux signaux, je recevrai ceux-ci simultanément.

Mais dans votre système, la loi de Michelson est valable comme dans le mien ; quoique vous soyez en mouvement par rapport à moi, les deux rayons ont donc, par rapport à vous, la même vitesse que par rapport à moi. Seulement, vous vous déplacez dans le sens de la flèche : vous courez au-devant de l'un, et vous fuyez devant l'autre. Pendant qu'ils sont en route, vous parcourez un certain chemin ; vous raccourcissez le trajet que l'un d'eux doit faire pour vous atteindre, et vous allongez l'autre.

Vous serez en W à l'instant où vous rencontrerez le rayon émané de B ; et celui venu de A ne frappera votre miroir que plus tard. Vous déclarerez donc que les deux signaux n'étaient pas simultanés ; et vous serez aussi fondé à le dire, que moi à soutenir le contraire, car vous aurez suivi la même méthode que moi, en appliquant la loi de Michelson à deux signaux lumineux qui ont été produits à la même distance de vous.

Bien entendu, nous arriverons à une constatation semblable, si les signaux sont faits dans votre système, et observés par moi. Il faut bien qu'il en soit ainsi, puisque notre idée de mouvement est relative, et que c'est par une pure convention que j'ai dit que vous êtes en mouvement, et moi immobile : tout doit se passer de même si nous faisons la convention inverse, et je déclarerai successifs les événements qui, dans votre système, vous apparaîtront simultanés.

Tout cela ne s'applique qu'aux événements produits à distance l'un de l'autre. Il est clair que si deux événements sont contigus, et qu'un de nous les déclare simultanés, ils apparaîtront également tels à l'autre, puisque, pour chacun de nous, les rayons émanés d'eux ont la même distance à parcourir.

Il est également clair que, plus ils se produiront loin l'un de l'autre, et plus grande sera la différence de parcours des deux signaux, et plus longue sera donc la durée qui les séparera, pour l'observateur non solidaire du mouvement.

Enfin, on voit aussi facilement que cette durée croît avec la vitesse relative des deux observateurs ; si bien que, si cette vitesse relative était précisément aussi grande que celle de la lumière, l'observateur considéré comme en mouvement fuirait devant l'un des deux rayons lumineux avec la vitesse même de ce rayon, qui ne le rattraperait jamais : entre ces deux événements, que l'autre observateur juge simultanés, il s'écoulerait, pour lui, un temps infini. De même, si la distance AB était suffisamment grande.

En résumé :

Si deux observateurs sont à l'état de mouvement relatif uniforme (c'est-à-dire dans l'état spécifié par le principe de Galilée), *et qu'on tienne compte de la loi de Michelson* (c'est-à-dire qu'on les mette en communication au moyen de signaux dont la vitesse est la même en tous sens), *deux événements non contigus, simultanés pour l'un d'eux, sont déclarés successifs par l'autre ;* et l'intervalle de temps que celui-ci observe entre eux croît avec la vitesse relative des observateurs et avec la distance qui sépare les deux événements.

On voit que la seule définition possible de la simultanéité, donnée plus haut, ne vaut que pour les événements survenant dans un même système, c'est-à-dire en des lieux qui participent à un même état de mouvement. C'est une idée parfaitement claire que celle des deux événements survenant en deux points fixes du globe ou d'un véhicule en mouvement, lorsque nous sommes nous-mêmes immobiles par rapport à ces points. Mais dire que deux événements sont simultanés quand ils se produisent en deux lieux à l'état de mouvement relatif (par exemple, le sol et un train, la terre ferme et un navire, la Terre et la Lune, Sirius et la Polaire), cette affirmation n'a aucun sens : la notion de simultanéité à distance est relative à l'état de mouvement de l'observateur.

15. — La relativité du temps.

On sent bien qu'il faut conclure de là que l'idée de durée est également relative.

La démonstration de ce fait est d'ordre mathématique, et ne peut être reproduite ici. Mais Einstein en a donné une explication en langage courant, s'appliquant à un cas particulier, et que voici :

Un train de chemin de fer, long de 10 kilomètres, est à l'arrêt, le mécanicien se trouvant à hauteur du kilomètre 110 de la voie, et le serre-frein de l'arrière, à hauteur du kilomètre 100. Le serre-frein émet un signal lumineux à l'instant précis où sa montre marque midi ; ce signal parvient au mécanicien à midi plus un trente-millième de seconde ; et pareillement, ils peuvent constater qu'un signal semblable, envoyé de l'avant à l'arrière, franchit la distance en un trente-millième de seconde. Et si je suis immobile sur la voie, je dirai comme eux.

S'ils recommencent l'expérience pendant que le train roule à toute vitesse, ils constateront qu'en vertu de la même loi, la lumière mettra encore le même temps à parcourir les 10 kilomètres, dans l'un et l'autre sens.

Mais, il n'en sera plus de même pour moi. Je verrai le signal du mécanicien partir vers l'arrière, mais je verrai aussi le serre-frein entraîné à sa rencontre. Pendant le trajet du signal du mécanicien, le serre-frein aura donc parcouru un chemin, si petit soit-il, qui viendra en déduction du trajet de ce signal. Au contraire, le mécanicien fuit devant le signal de son camarade, et ne sera rattrapé par lui qu'après avoir parcouru un certain chemin. Or, la loi de Michelson est valable pour moi comme pour eux. Suivant moi, donc, la lumière, parcourant à la même vitesse des chemins inégaux, voyage pendant des temps inégaux, selon qu'elle se propage vers l'avant ou vers l'arrière du train. D'où Einstein conclut : « les durées des deux propagations sont donc jugées égales ou inégales, selon qu'on les observe du train ou de la voie. Autrement dit : *l'appréciation du temps dépend de l'état de mouvement de l'observateur* ».

Inutile de dire que ce raisonnement est impeccable. Mais, on peut lui reprocher de porter sur un exemple particulier, et de laisser par conséquent dans le doute ce qui se passe en présence de tout autre phénomène que la propagation de la lumière. Il me semble que la relativité du temps peut être rendue sensible par la considération plus générale, et non moins élémentaire, qui suit.

On a vu, au paragraphe 7, ce qu'il faut entendre par le mot coïncidence. Quand nous disons que deux objets coïncident dans le temps ou dans l'espace, c'est simplement que nous sommes impuissants à constater l'écart qui peut exister entre eux. Or, depuis un siècle, l'approximation de nos mesures a augmenté prodigieusement. Pour nos aïeux, deux événements se succédant à moins d'un dixième de seconde d'intervalle étaient simultanés ; l'analyse spectrale nous révèle aujourd'hui des écarts de l'ordre de grandeur du trillionième de seconde ; et nos petit-fils en sauront plus que nous.

Lors donc que nous disons que deux événements coïncident, il n'y a qu'une chance très faible, infinitésimale même, pour qu'ils soient réellement confondus. Dans l'immense majorité des cas, ils sont simplement séparés par un intervalle trop faible pour nos moyens d'observation.

Or, nous savons qu'il suffit qu'un observateur, doté des mêmes instruments que nous, soit en mouvement par rapport à nous, pour que ces deux événements, qui nous semblent coïncider, lui apparaissent successifs : leur intervalle, non appréciable pour nous, lui est rendu sensible par notre état de mouvement relatif.

Supposons donc, pour fixer les idées, que nous ayons des appareils capables de mesurer seulement le centième de seconde, et que deux événements se produisent dans mon système (c'est-à-dire en des points fixes par rapport à moi), à un intervalle d'un millième de seconde ; je les déclarerai simultanés. Mais vous, qui êtes en mouvement par rapport à moi, vous les distinguerez, c'est-à-dire que vous leur attribuerez un intervalle mesurable avec nos instruments, et qui sera, je suppose, de 5 centièmes de seconde.

Considérons maintenant une durée sensible pour moi, et que j'évalue à une seconde. Elle est mille fois supérieure à la précédente, qui me paraissait nulle. Mais pour vous, les deux durées sont également mesurables, et leur rapport reste le même ; vous évaluerez donc la deuxième à mille fois 5 centièmes de seconde, soit à 50 secondes.

D'où la conclusion : le mouvement relatif exerce, en quelque sorte, un effet grossissant sur les durées observées dans un autre système. Si deux observateurs sont à l'état de mouvement relatif, les durées évaluées par chacun d'eux, dans son système, sont jugées plus longues par l'autre.

Chacun d'eux, attribuant à la durée d'un même phénomène un plus grand nombre de secondes que l'autre, *aura l'impression que sa montre marche plus rapidement, que celle de l'autre va en retardant.*

A cet énoncé général se rattachent les détails suivants :

Dans toute l'étendue du système mobile, la marche des montres est jugée uniforme par l'observateur fixe, pour une vitesse relative donnée ; et il la trouve d'autant plus ralentie, que la vitesse relative est plus grande ; autrement dit, pendant que cet observateur immobile compte une heure sur sa montre, il estime que les montres du système mobile ont marqué une durée moindre, la même pour toutes.

Mais d'autre part, il estime que ces diverses montres sont, à un instant donné, différemment décalées par rapport à la sienne : à mesure qu'il observe, sur le mobile, des lieux plus éloignés de lui dans le sens de la translation, il y constate l'existence d'un « temps local » plus différent du sien.

***

Il faut se hâter d'ajouter que, dans les conditions de nos observations courantes, les écarts ainsi produits par l'état de mouvement sont tout à fait imperceptibles.

Considérons par exemple un train rapide franchissant en nombre rond 30 mètres par seconde, soit 108 kilomètres à l'heure (la lumière est dix millions de fois plus rapide) ; le retard attribué par les voyageurs aux horloges des gares, et en même temps par les chefs de gare aux montres des voyageurs, ne sera que d'une seconde sur six millions d'années !

La Terre tourne autour du Soleil avec une vitesse moyenne de 30 kilomètres par seconde, soit mille fois supérieure à celle de notre train ; le retard des montres, dans ce cas, est d'une seconde en six ans et trois mois, ou 16 secondes par siècle.

Pour une comète courant vingt fois plus vite que la Terre, le retard atteindra cinq quarts d'heure par siècle ; et l'on conçoit déjà que, si le retour de l'astre n'est attendu qu'au bout de plusieurs siècles, et qu'on l'ait calculé en employant le temps qui ne convenait pas, le rendez-vous sur le réticule de la lunette puisse être manqué.

On voit finalement que ces différences, dédaignables dans la vie courante, sont à considérer, soit au bout de temps très longs, soit quand on considère des vitesses de l'ordre de grandeur de celle de la lumière, c'est-à-dire chiffrées par dizaines de milliers de kilomètres ; telles sont les vitesses des rayons émanés des corps radio-actifs.

16. — Le renversement de l'ordre de succession et l'incohérence du firmament.

L'effet le plus surprenant de la relativité du temps est que, dans certaines conditions, on peut être en désaccord sur l'ordre de succession de deux événements. Je dirai qu'un événement s'est produit dans mon système avant un autre ; vous soutiendrez que celui-ci était antérieur ; et nous aurons également raison, chacun de son point de vue !

La chose est aisée à comprendre, à l'examen de la figure 5 ; celle-ci diffère de la figure 4 en ce que, pour marquer qu'il ne s'agit plus de signaux simultanés, les deux éclats lumi-

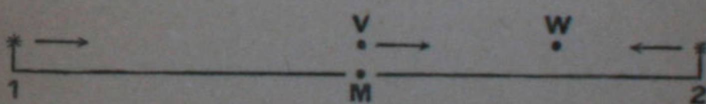


Figure 5.

neux sont désignés, non par des lettres, mais par les chiffres 1 et 2 ; en outre, votre seconde position W est beaucoup plus voisine de 2 que de 1.

Nous savons que si vous étiez à ma hauteur, en V, et immobile par rapport à moi (auquel cas, vous feriez partie de mon système), vous auriez la même impression que moi. Mais, vous fuyez devant le signal 1, et courez au-devant de 2 ; vous hâtez donc, relativement, la réception de celui-ci ; plus la distance entre les deux signaux sera grande, ou encore, moins il s'écoulera de temps entre eux, et plus il sera favorisé par votre mouvement. Dans des conditions convenables, il existera donc un point W de votre route, où les deux signaux vous apparaîtront simultanés ; et plus à droite, vous recevrez 2 avant 1.

Il ne faudrait pas conclure de là que l'on puisse arriver à voir un effet avant sa cause, à voir les actes retournés, comme les montre un film cinématographique déroulé à l'envers ; ce qui précède ne s'applique qu'à des événements *indépendants l'un de l'autre.*

Supposons, par exemple, que les astérisques de la figure représentent deux étoiles suffisamment éloignées l'une de l'autre, et dans des conditions de mouvement telles, que je fasse pratiquement partie de leur système (sur le grand nombre des étoiles, cela peut arriver), et supposons que j'y observe deux explosions, dans l'ordre 1, 2. Si vous êtes en mouvement par rapport à moi, vous direz que l'explosion 2 s'est produite la première.

Mais supposons qu'un bolide soit parti de 1 pour aller en 2. L'effet de votre mouvement relatif sera de vous le montrer ralenti, ainsi que nous verrons plus loin. Vous le verrez arriver au but après un temps plus long que moi, mais vous ne pourrez pas le voir arriver d'abord, et partir ensuite, ni aller en sens inverse de son mouvement ; ces deux hypothèses sont également absurdes.

Or, toute relation de cause à effet, entre deux événements distants, peut se traduire, en définitive, par un transport de quelque chose, matière ou énergie, peu importe ; et ce quelque chose ne peut pas se transporter plus vite que la lumière. Il y a donc une limite à la possibilité, pour un événement, d'être la cause d'un autre, c'est-à-dire à ce que Langevin appelle fort nettement la *possibilité d'influence*, ou *d'action ;* ou encore, nous dirons que chaque événement, considéré simultanément dans l'espace et le temps, a un *rayon d'action* déterminé (1).

(1) [Pour plus de détails, voir au paragraphe 25.]

L'exemple ci-dessus, des deux étoiles, suffit d'ailleurs à montrer qu'une telle relation ne peut pas être renversée ; et le fait positif qui subsiste, la possibilité du renversement de la succession de deux événements indépendants, est déjà bien assez merveilleux pour qu'on n'y ajoute pas une conception erronée. Voici un exemple de ses conséquences.

On savait déjà que l'image que nous recevons du ciel étoilé ne répond à rien de précis.

Nous nous figurons naturellement que chaque étoile est dans la direction suivie par le rayon qui parvient à notre œil ; or, cette direction n'est pas celle où se trouve l'étoile, mais celle où elle se trouvait lorsque le rayon s'est mis en route.

Quand il s'agit de distances terrestres, la durée du parcours de la lumière n'entre pas en ligne de compte ; mais elle n'est pas négligeable en astronomie. La lumière ne met guère que cinq quarts de seconde à nous venir de la Lune. Mais nous voyons encore le Soleil huit minutes et un quart après qu'il a disparu à l'horizon ; nous commençons à l'apercevoir un temps pareil après son lever ; cela correspond à un déplacement égal à quatre fois son diamètre apparent, ce qui n'est pas peu de chose.

Les distances interstellaires sont incomparablement plus grandes. Une trentaine d'entre elles sont assez « petites » pour avoir pu être évaluées avec nos moyens actuels. Notre voisine immédiate, Alpha du Centaure, est à une distance qui se mesure par quatre ans et demi de parcours de la lumière ; la vingt-quatrième étoile, par ordre de distance, est la Polaire, dix fois plus éloignée (plus de 46 années de lumière). Et cela n'est rien : on n'a pas hésité à énoncer des distances d'un million d'années de lumière, sans compter les astres que nous ne voyons pas encore. Il peut avoir existé des astres, déjà éteints aujourd'hui, et dont les premiers rayons ne parviendront à nos descendants que dans des siècles ! En résumé, quand deux étoiles nous semblent très voisines, leurs directions peuvent être, pour l'une, celle d'il y a quatre ou cinq ans, et pour l'autre, celle d'il y a un million d'années ; pendant que ces rayons cheminaient, leurs sources se sont déplacées, nous ne savons de combien ; la « distance angulaire » que nous mesurons entre elles, et que nous portons sur notre carte du ciel, ne correspond donc à aucune position qu'elles aient occupé simultanément, à aucune idée précise !

A cela s'ajoute un autre phénomène de relativité, celui de l'aberration, exposé plus haut (§ 11) : pendant que la lumière d'une étoile chemine vers nous, la Terre décrit un certain nombre de fois son orbite, et de là résulte, pour chaque étoile, une petite révolution apparente, décrite dans le ciel, et variable selon la position de l'étoile par rapport au plan de l'écliptique ; nous voyons l'étoile, non dans la direction où elle se trouve, mais dans une certaine « direction fictive ».

Ce désordre est complété maintenant par la transformation que subit la notion de simultanéité.

Nous admettions jusqu'ici que si deux événements, par exemple la formation de deux protubérances, nous apparaissent simultanément en des points diamétralement opposés du Soleil, c'est qu'ils se sont produits simultanément : étant donnée la vitesse de propagation de la lumière, ces points sont, en effet, pratiquement à la même distance de nous. Or, nous savons aujourd'hui que, pour un observateur solidaire du Soleil, ces deux événements, que notre mouvement relatif nous montre simultanés, se sont produits à un demi-millième de seconde d'intervalle. Sans doute, la différence est faible, mais cela tient à la lenteur de notre mouvement relatif et à la petitesse du Soleil. Mais on vient de constater (nous reviendrons sur ce point) que l'étoile Antarès a un diamètre de 670 millions de kilomètres, 483 fois le diamètre du Soleil. Si nous pouvions y observer deux phénomènes en des lieux diamétralement opposés, et qu'ils nous parussent simultanés, ils se seraient produits, sur l'astre même, à un intervalle de temps de près d'un quart de seconde (225 millièmes), à supposer que notre vitesse, relative à Antarès, ne soit que de 30 km/sec. ; et si cette vitesse relative était de 300 km/sec., l'intervalle serait de 2 secondes et demie. Si enfin, pour un observateur solidaire d'Antarès, les deux événements, supposés indépendants, s'étaient produits à des intervalles de temps moindres de ceux-là, ils nous apparaîtraient en ordre inverse !

Sans doute l'interversion est ici conditionnée par un intervalle de temps très faible. Mais aussi, le globe formidable d'Antarès n'est qu'un point lumineux dans l'espace. Sur la distance qui sépare deux étoiles, ou deux nébuleuses, nous trouverions des intervalles de durée quelconque. Par exemple, on croit avoir découvert une étoile nouvelle en 1921 ; nous n'avons aucune raison de supposer qu'elle s'est allumée après la *nova* que Tycho Brahé aperçut en 1572.

En résumé, la configuration des étoiles, telle que nous la voyons, n'est qu'une apparence fallacieuse, provenant de la rencontre, sur notre rétine, d'impressions impossibles à classer dans le temps et dans l'espace. Le spectacle du ciel étoilé, que poètes et théologiens vantent comme l'exemple de l'harmonie parfaite, est celui de l'incohérence la plus désordonnée.

La théorie de la relativité a achevé de le prouver.

17. — La Relativité de la longueur.

La longueur qu'on attribue à une ligne, comme la durée d'un phénomène, dépend de l'état de mouvement de celui

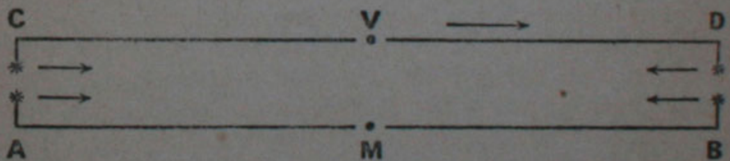


Figure 6.

qui la mesure. Je pense pouvoir faire concevoir facilement cette notion par le raisonnement qui suit :

Replaçons-nous dans la situation qui nous a servi à étudier la simultanéité (*fig.* 6). Je me trouve à terre, en M, au milieu de la distance AB, supposée longue de 10 kilomètres, et vous êtes dans un système qui peut se déplacer par rapport à moi. Vous êtes en V, au milieu d'une distance CD, que nous sommes d'accord à dire égale à AB (1).

Considérons maintenant votre système en mouvement, en ligne droite et avec une vitesse constante (c'est-à-dire dans les conditions du principe de Galilée), et supposons qu'il défile le long du mien. Convenons enfin que le passage (évidemment simultané) des points C et D en regard des points A et B déclenchera automatiquement deux signaux lumineux en ces points (c'est-à-dire dans mon système) ; et deux autres aux points C et D (c'est-à-dire chez vous) ; à cet instant vous serez en V, à hauteur de ma position M.

Observez ce qui se passe chez moi. Comme vous vous déplacez dans le sens de la flèche, vous recevrez le signal de B avant celui de A. Vous direz donc que, lorsque l'avant D de votre système est arrivé en B, l'arrière C n'était pas encore arrivé en A, ou, en d'autres termes, que votre distance CD est plus longue que ma distance AB. Or, à vos yeux, la distance CD est bien toujours de 10 kilomètres, comme lorsque nous l'avons mesurée ensemble, au repos ; vous n'avez aucun motif de la supposer allongée ; et si vous vouliez la vérifier, et qu'elle eût ainsi varié, les règles que vous emploieriez auraient varié dans le même rapport, et vous diraient encore : 10 kilomètres. Vous conclurez donc que ma distance AB, que vous ne pouvez plus mesurer directement, a maintenant une longueur inférieure à 10 kilomètres, et qu'elle s'est raccourcie.

Naturellement, si j'observe ce qui se passe chez vous, je ferai le même raisonnement ; ayant toutes raisons de penser que ma base AB mesure toujours 10 kilomètres, je dirai que votre longueur CD s'est raccourcie.

Ainsi, *lorsque deux systèmes sont à l'état de mouvement relatif, un observateur situé dans l'un d'eux estime que les longueurs de l'autre, parallèlement à la direction du mouvement,*

(1) [Pour établir cet accord, on peut se servir de ce que les longueurs perpendiculaires au mouvement ne sont pas affectées par lui (voir page suivante). Nous placerons donc nos mètres dans cette position, et les vérifierons par triangulation. Après cela, chacun de nous sera libre de déplacer le sien *dans son système*, et de l'y employer à mesurer une direction quelconque.]

sont raccourcies, dans un rapport précisément inverse de celui de l'allongement des durées, et, par conséquent, d'autant plus que le mouvement relatif est plus rapide : à la vitesse de la lumière, ces longueurs paraîtraient nulles.

Ainsi est démontrée rationnellement, par la confrontation des deux lois de Galilée et de Michelson, l'exactitude de l'hypothèse que Lorentz avait formulée arbitrairement.

***

On se convaincra aussi facilement que les longueurs perpendiculaires au sens du mouvement ne sont pas altérées, et que, dans les directions intermédiaires, la contraction varie depuis ce zéro jusqu'à un maximum, qui correspond à la direction de l'entraînement.

Il suit de là qu'un volume n'est pas seulement réduit, mais déformé. Une sphère en mouvement n'est pas vue comme une sphère plus petite, mais comme un ellipsoïde, aplati dans le sens du mouvement ; si elle allait aussi vite que la lumière, elle apparaîtrait comme un disque circulaire infiniment plat.

Ce n'est donc pas seulement la longueur qui est relative, mais bien la forme des objets. La notion de rigidité est incompatible avec celle de mouvement ; elle ne s'applique qu'aux objets solidaires de l'observateur.

***

Ces détails sembleront peut-être un peu minutieux ; mais on a peine à concevoir l'extrême souci de précision qui est nécessaire, quand on essaie de présenter de semblables théories en langage courant : une image, séduisante au premier abord, risque d'égarer complètement le lecteur. C'est ainsi qu'un récent article de vulgarisation, très remarqué, débutait en ces termes :

« Supposons que deux expérimentateurs habiles mesurent, tous deux avec des règles parfaites et avec une précision absolue, la longueur d'une rue, mais que l'un opère plus rapidement que l'autre. Trouveront-ils la même longueur? « Oui », disait un disciple de Newton et de la science classique. « Non », répond Einstein. »

Erreur complète. Einstein répondrait « oui », car cette image donne une idée absolument fausse du phénomène. Les règles, en effet, ne paraissent raccourcies que tandis que leurs porteurs se déplacent. Pendant qu'elles sont posées à terre, comme il faut bien qu'elles le soient pour qu'on puisse effectuer semblable mesure, elles font partie du système « terre » ; elles ont la longueur de tout autre mètre immobile ; elles sont égales. De quelque manière que se démène donc un des arpenteurs, chaque fois qu'il prendra une mesure, il la trouvera égale à celle de son collègue ; il pourra terminer son travail plus tôt, mais il arrivera au même résultat.

Le même auteur a donné, pour la contraction longitudinale, une explication vulgarisée que d'autres ont reproduite comme très claire, mais qui, malheureusement, est erronée. En premier lieu, elle suppose que les rayons lumineux émanés d'un mobile participent à son mouvement à l'instant où ils le quittent (ce qui est contraire à la loi de Michelson), mais non plus à l'instant où ils nous parviennent. Il y a là une contradiction inconcevable ; le moins qu'on puisse se demander, c'est à quel instant se produit leur changement de vitesse. Et d'autre part, la démonstration suppose que l'observateur se trouve entre l'avant et l'arrière du mobile, au moment où celui-ci défile devant lui, en sorte que l'avant s'éloigne de lui, tandis que l'arrière s'en rapproche. Mais supposez que le mobile soit à distance, de telle sorte que son avant et son arrière se rapprochent ou s'éloignent tous deux de l'observateur, et vous trouverez des résultats différents. Le lecteur un peu familiarisé avec la physique se rend compte que cette démonstration se rapporte au phénomène de Doppler et Fizeau, mais non à celui que Lorentz et Einstein ont élucidé (voir § 33).

***

Ajoutons enfin que, comme l'allongement des durées, la contraction des longueurs est insensible dans le cas des vitesses mécaniques et astronomiques. Un exemple suffira : le diamètre moyen de la Terre étant de 12 750 kilomètres, sa contraction apparente, dans le sens de la révolution autour du Soleil, n'est que de 64 millimètres, et celle du diamètre solaire, de 7 mètres sur 1 390 000 kilomètres !

18. — La relativité de la vitesse.

On sait qu'une vitesse uniforme, comme aussi une vitesse moyenne, est exprimée par le rapport du chemin parcouru à la durée du trajet.

Or, nous venons de voir que, quand on observe un système en mouvement, les longueurs parallèles à la translation y paraissent réduites, tandis que toutes les durées y paraissent augmentées ; pour cette double raison, si un mobile se déplace *à l'intérieur de ce système*, nous lui attribuerons une vitesse moindre que celle qui est mesurée sur le système même. L'observateur qui fait partie du système mesure une longueur l, parcourue pendant un temps t, et dit donc que la vitesse du mobile est égale à l/t. Quant à nous, appelant a un certain coefficient plus grand que l'unité, nous évaluons la distance parcourue à l/a, et la durée du trajet à $t \times a$; effectuons le quotient, et nous trouvons une vitesse égale au quotient de la précédente par le carré de a.

Dans la direction perpendiculaire à celle du mouvement, nous savons que les longueurs nous apparaissent inchangées, les durées étant toujours multipliées par a. Les vitesses seront donc simplement divisées par ce coefficient.

Enfin, dans les directions intermédiaires, nous attribuerons aux vitesses des valeurs comprises entre les deux ci-dessus.

En résumé, à l'intérieur d'un système en mouvement, toutes les vitesses paraissent plus ou moins réduites, aux yeux d'un observateur extérieur au système. La réduction est d'ailleurs d'autant plus forte, que la vitesse relative du système et de l'observateur est plus grande. Si un train passait devant nous avec une vitesse assez grande, et qu'il contînt les Méridionaux les plus exubérants, nous leur attribuerions un flegme britannique ; et si un tel système atteignait la vitesse de la lumière, nous ne verrions sur lui qu'immobilité complète.

19. — La limitation de la vitesse et la règle de composition.

On a peine à comprendre que, pendant longtemps, les plus grands savants aient cru qu'une vitesse peut être infinie. Bacon est le premier qui l'ait contesté en ce qui concerne la lumière. Mais Newton admettait encore que certains effets peuvent se propager instantanément ; cela est expressément énoncé dans son principe de l'égalité de l'action et de la réaction, que Poincaré a dû remettre au point.

Dans ses *Essais sur la philosophie des sciences*, parus en 1896, Freycinet écrivait fort justement : « Non seulement le physicien ne connaît pas, mais il ne conçoit pas de force infinie, de vitesse infinie, de température infinie. Tout au plus admet-il la possibilité d'une quantité illimitée de matière répandue dans l'espace. Mais cette éventualité ne pèse pas sur ses calculs et n'influence pas ses formules. Il opère et raisonne toujours sur le fini ».

En ce qui concerne la vitesse, l'idée de croissance jusqu'à l'infini est purement absurde. Qui dit vitesse, en effet, dit mouvement, passage en des lieux successifs ; or, une vitesse infinie signifierait une durée nulle de parcours, c'est-à-dire l'ubiquité du mobile sur sa trajectoire ; ce serait, suivant l'expression de Clémence Royer, « un mouvement sans durée, fini avant d'être commencé ». Ce ne serait même plus un mouvement, puisque le mobile serait, à la fois, sur tous les points de sa trajectoire. C'est là une idée contradictoire avec la définition même de la vitesse.

Quelle est, maintenant, la valeur maximum que puisse atteindre une vitesse ? — A cette question, la théorie de la relativité répond : la vitesse de la lumière. Et c'est cette valeur que j'ai admise plus haut, en disant que si un mobile atteignait pareille vitesse, les montres paraîtraient immobiles, les longueurs se réduiraient à zéro dans le sens de l'entraînement, les vitesses à l'intérieur du mobile seraient nulles. Mais cette détermination a besoin d'une petite mise au point, sur laquelle nous reviendrons.

Quoiqu'il en soit, nous pouvons admettre qu'en première approximation, 300 000 kilomètres par seconde est la vitesse qui ne saurait être dépassée.

Il faut remarquer que cette limitation exige que l'on retouche la règle suivant laquelle, jusqu'ici, on établissait la résultante de plusieurs vitesses (règle connue sous le nom de *parallélogramme des vitesses*, ou *des forces*). Cette règle admet en effet que, si une vitesse s'ajoute à une autre de même direction et de même sens, la résultante est égale à leur somme. C'est bien ce que nous avons admis au début du paragraphe, dans notre exemple de la balle lancée du haut d'une voiture.

Eh bien ! cette règle est toujours valable en première approximation, pour nos applications courantes, de même que, pour ces applications, un mètre reste égal à lui-même, quel que soit son état de mouvement. Mais elle ne vaut plus aux grandes vitesses, à celles qui approchent de la limite. Ainsi, supposons que deux trains rapides entrent en collision, à la vitesse de 30 mètres par seconde ; leur vitesse de choc n'est pas de 60 m/sec, comme nous le disons ; mais il ne s'en faut que de 4 dixièmes de micron (4 dix-millionièmes de millimètre), ce qui n'est évidemment pas à considérer. Mais ajoutez ensemble deux vitesses de 100 000 kilomètres par seconde, et la résultante ne sera pas 200 000, mais seulement 180 000 km/sec ; deux vitesses de 200 000 donnent une résultante de 277 000 au lieu de 400 000 ; et si la somme des deux vitesses données dépasse 300 000, leur résultante sera toujours de 300 000 km/sec.

20. — La relativité de la masse.

La notion de la masse est voilée à beaucoup de personnes par celle du poids, dont elle est pourtant bien distincte. Disons simplement que la masse d'un corps est *la mesure* *de la résistance qu'il oppose à un effort tendant à le déplacer*, ou, autrement dit, de son *inertie*. Mesurez un effort au dynamomètre, et appliquez-le à un corps ; en quelque lieu que vous opériez, le corps, supposé parfaitement libre, prendra la même vitesse.

Le poids est la résistance qu'un corps oppose à la pesanteur, en quoi il ressemble à la masse ; seulement, la pesanteur varie d'un lieu à l'autre, en quoi elle diffère des forces envisagées dans la définition de la masse ; elle décroît à mesure qu'on s'éloigne du centre de la terre (1). Par exemple, un homme qui pèse 75 kilogrammes au pied de la Tour Eiffel, se trouve allégé de 7 grammes à son sommet ; et tout corps perd un deux-centième de son poids en passant d'un pôle à l'équateur, soit 375 grammes pour cet homme de poids moyen. Mais la masse, étant la résistance opposée à une force constante, est soustraite à ces variations. Elle est la même au sommet du Mont-Blanc qu'au niveau de la mer. Si la Terre tournait 17 fois plus vite, c'est-à-dire que le jour ne durât qu'une heure et 25 minutes de notre temps actuel, la pesanteur serait nulle à l'équateur ; un corps, une fois soulevé du sol, resterait flottant dans l'air où on l'abandonnerait ; mais pour le déplacer, il faudrait développer le même effort que maintenant, car sa masse serait la même.

Newton, Maupertuis et Freycinet ont donné trois définitions, également intéressantes, de la masse. Celle qui convient le mieux à notre objet est celle de Newton, résumée au début de ce paragraphe : *la masse est le rapport constant qui existe entre une force et la vitesse qu'elle imprime, au bout de l'unité de temps, au corps considéré* (quantité qu'on appelle l'*accélération*). Mais je crois avantageux, pour l'exposition

---

(1) Elle décroît par la double raison que l'action de la gravitation est inversement proportionnelle au carré de la distance (loi de Newton), et que la rotation de la Terre développe une force centrifuge qui tend à projeter les corps dans l'espace.

Bien entendu, ce n'est pas au moyen de la balance qu'on peut reconnaître les variations de la pesanteur, puisqu'elles se font également sentir sur le contenu des deux plateaux ; c'est au moyen de la tension plus ou moins grande du ressort d'un peson, ou dynamomètre.

du présent travail, de retourner cette définition, et de dire : *la vitesse acquise par un corps au bout d'une seconde* (ou accélération) *est le quotient de la force appliquée au corps par la masse de celui-ci.* Cet énoncé fait mieux ressortir la propriété de la masse, qui est de résister à l'action d'une cause de mouvement.

D'autre part, soit qu'on applique au corps, pendant l'unité de temps, une force double, triple, quadruple, soit qu'on fasse agir la force primitive pendant un temps double, triple, quadruple, l'accélération se trouve doublée, triplée, quadruplée. Bref, l'accélération produite est proportionnelle à la force, et leur rapport constant est ce qu'on appelle la masse. Telle est la base de la mécanique newtonienne.

La constance attribuée à la masse a fait considérer cette quantité comme une propriété caractéristique de chaque corps, comme la mesure de la « quantité de matière » dont il est formé. Cette dernière expression figure dans tous les traités de mécanique.

Or, nous savons aujourd'hui que cette proportionnalité n'existe pas, que la masse n'est pas constante. La démonstration de la loi qui régit la masse se déduit, par le calcul, de faits expérimentaux de l'électrodynamique, et ne saurait trouver place ici. Mais je crois qu'on peut faire concevoir la chose assez nettement par la considération qui suit.

Nous savons qu'aucune vitesse ne peut croître au delà d'une certaine limite. Or, cela revient à dire que l'accélération n'est pas proportionnelle à la force ; car, si la proposition de Newton était exacte, il suffirait de faire croître indéfiniment la force appliquée à un corps, ou d'appliquer une force quelconque pendant un temps indéfiniment croissant, pour accroître la vitesse du corps au delà de toute limite.

La proportionnalité énoncée par Newton, et que nous indiquent bien les mesures que nous pouvons effectuer, n'existe qu'en première approximation, aux faibles vitesses, parce que les écarts réellement existants échappent, par leur petitesse, à nos moyens d'investigation : ils ne sont pas à notre échelle. Mais à mesure que la vitesse d'un corps augmente, il oppose une plus grande résistance au mouvement : sa masse s'accroît. On peut dire que sa vitesse acquise est un frein qui résiste de plus en plus énergiquement à toute nouvelle accélération ; ou encore, si l'on ne craint pas un langage anthropomorphique, on peut assimiler l'inertie à une fatigue qui croît avec cette vitesse. Finalement, il vient un moment où la vitesse ne peut plus augmenter : la masse est devenue infinie.

La nouvelle notion introduite par la relativité est la suivante : si un corps est au repos par rapport à l'observateur, et qu'on lui applique une force, il prend, *au début de son mouvement*, une accélération proportionnelle à cette force ; le rapport de ces deux quantités est la *masse au repos*, ou *masse initiale*. Une fois le mouvement en train, ce coefficient croît avec la vitesse ; c'est la *masse d'inertie*, qui tend vers l'infini quand la vitesse tend vers sa limite supérieure.

On voit que la notion newtonienne d'une certaine masse déterminée, caractéristique de chaque corps, subsiste : c'est la *masse au repos*, qui se présente à nous comme *la limite du rapport de la force à l'accélération, lorsque celle-ci tend vers zéro*, c'est-à-dire au début du mouvement, quand la durée de celui-ci tend vers zéro.

En résumé, la masse d'un corps, jusqu'ici réputée absolue, varie avec le mouvement relatif du corps et de l'observateur. Nous avons toujours le droit de dire qu'un corps a une masse de tant de grammes ; mais nous devons spécifier quelle est, à ce moment, la vitesse du corps par rapport à nous ; sinon, il doit être sous-entendu que nous parlons d'un corps au repos (c'est-à-dire partageant notre état de mouvement).

Mais encore une fois, ni les ingénieurs, ni même les balisticiens, n'ont à se préoccuper de ce changement. Considérons, par exemple, un train rapide pesant 250 tonnes ; à la vitesse de 30 mètres par seconde (108 km par heure), sa masse n'est augmentée que de 20 quatrillionièmes de sa valeur, ce qui représente un poids supplémentaire de 5 millièmes de milligramme ; il n'y a pas là de quoi nécessiter une notable dépense supplémentaire de combustible. De même, si un projectile de 500 kilogrammes est lancé à la vitesse initiale de 1 500 mètres par seconde, il gagne seulement 6,25 milligrammes sur son poids au repos ; son énergie initiale, d'après les formules classiques, serait en nombre rond de 57 340 000 kilogrammètres ; la relativité y ajoute 7 dix-millièmes de kilogrammètre : ce n'est évidemment pas la peine d'en parler. Mais, comme toujours, le tableau change si l'on aborde les grandes vitesses. Si, par exemple, notre projectile avait la vitesse de 30 000 kilomètres par seconde, son augmentation de poids serait de 2 kg. 500 ; à une vitesse quadruple, elle atteindrait 45 kg ; elle serait de 125 kg à la vitesse de 180 000 kilomètres.

21. — L'énergie totale.

Ce qui nous intéresse, en mécanique, ce ne sont pas les forces, notion toute théorique, mais leurs efforts, les services qu'elles peuvent nous rendre, le travail qu'elles effectuent.

Pour définir et mesurer le travail, il était naturel de le considérer sous sa forme la plus immédiatement perceptible, celle qui résulte d'un transport. Traîner un fardeau est un travail ; traîner ce fardeau à une distance double, ou bien un fardeau double à la même distance, est un travail double du premier. D'où la définition : *le travail exécuté par une force est le produit de cette force par le déplacement de son point d'application.*

Quand un corps est ainsi mis en mouvement, au prix d'un certain travail, il absorbe, il emmagasine ce travail, et reste constamment capable de le restituer en perdant sa vitesse ; tel, un marteau qui enfonce un clou. La capacité de fournir du travail, en général, se nomme *énergie ;* et celle dont il vient d'être question, et qui résulte exclusivement de l'état de mouvement, se nomme *énergie de mouvement,* ou *énergie cinétique.* On démontre qu'elle est égale au demi-produit de la masse par le carré de la vitesse.

Mais l'énergie se présente sous toutes sortes d'autres formes. Même quand un corps gît immobile devant nous, il possède une capacité de travail, une *énergie potentielle,* qui n'attend, pour se manifester, que d'être libérée par un moyen convenable.

La première de ces énergies qu'on ait introduite dans les calculs de la mécanique est l'*énergie de position*, qui tient à la situation du corps considéré par rapport à la masse terrestre, vers le centre de laquelle il gravite. L'eau accumulée dans un réservoir y demeure inerte ; si l'on ouvre la vanne, elle pourra faire tourner la roue d'un moulin, en lui communiquant une énergie qu'elle contenait « en puissance » en raison de sa situation élevée. De même, quand on remonte le poids d'une horloge, on dépense un travail qui s'y incorpore sous forme d'énergie de position ; et quand on lui rend sa liberté, il restitue cette énergie et la communique au mouvement d'horlogerie qu'il actionne.

Dans le même ordre d'idées, c'est-à-dire dans la catégorie des énergies de position, on peut citer toutes les formes d'énergie que l'on met en réserve dans un système matériel en modifiant les positions relatives de ses éléments, et qui sont restituées lorsque le système reprend sa forme primitive ; c'est ce qui arrive, par exemple, quand on remonte le ressort d'une montre, ou qu'on dresse un simple piège à rats.

Depuis Newton jusqu'au début du XIX^e siècle, on ne connaissait l'énergie que sous les formes mécaniques qui viennent d'être citées. Lorsque des parties d'un système étaient en mouvement, on disait que leur énergie était *actuelle* (c'est-à-dire : en action), ou *cinétique* ; et l'on appelait *énergie potentielle* (c'est-à-dire : en puissance), celle que les parties du système, actuellement maintenues immobiles, sont capables de développer si on leur rend la liberté de se mettre en mouvement. L'*énergie totale* du système était la somme de son énergie cinétique et de ses énergies potentielles.

Mais maintenant, nous connaissons quantité de phénomènes qui peuvent être transformés en énergie cinétique, suivant des proportions bien déterminées et constantes, et qui ne sont donc que des formes diverses de l'énergie potentielle.

En première ligne, la chaleur. Un gramme de charbon de bois, si on y met le feu, peut développer jusqu'à 8 « grandes calories », équivalant à 3400 kilogrammètres. Ce n'est là, bien entendu, qu'un résultat théorique, la somme de la quantité de chaleur que ce charbon peut fournir. Il ne faudrait pas conclure de ce nombre qu'il suffise de brûler un gramme de charbon pour élever d'un mètre un poids de 3400 kilogrammes; nos machines n'ont malheureusement pas de pareils rendements.

Mentionnons encore l'énergie développée dans les réactions chimiques, et qu'on utilise notamment dans les piles électriques; celle du courant électrique; celle de la lumière, qui joue un si grand rôle dans la nutrition des végétaux, et à laquelle nous devons la photographie, etc.

Toutes les formes de l'énergie sont interchangeables, suivant des proportions déterminées, qu'on appelle leurs *équivalents;* c'est ainsi que nous avons transformé, plus haut, de la chaleur en énergie cinétique, à raison d'une grande calorie par 425 kilogrammètres (équivalent mécanique de la chaleur). On ne peut pas créer ou détruire de l'énergie; on ne peut que transformer une de ses manifestations en une autre; telle est la *loi de la conservation de l'énergie*, posée par Sadi Carnot et retrouvée par Robert Mayer.

Les formes dont il vient d'être question peuvent se grouper en trois catégories. L'énergie de mouvement et celle de position concernent le mouvement d'ensemble de toutes les molécules d'un corps, par rapport à un autre corps; elles sont étudiées par la mécanique. D'autres, comme la chaleur, l'électricité, dépendent des vibrations des molécules à l'intérieur du corps; elles dépendent de forces *intermoléculaires*, et sont du domaine de la physique. Les autres, comme la combustion et les réactions chimiques en général, déterminent la séparation des éléments constitutifs des molécules et leur regroupement en de nouvelles combinaisons chimiques; nous avons ici des forces *interatomiques*.

Enfin, nous savons aujourd'hui que les atomes eux-mêmes sont des agrégats, dont la cohésion est maintenue par des forces *intra-atomiques*, et qui se désagrègent si l'équilibre vient à être rompu entre ces forces. Il y a là une quatrième source d'énergie qui doit évidemment, comme les précédentes, entrer en ligne de compte dans l'évaluation de l'énergie totale, et il se trouve précisément que cette source est énormément plus abondante que les précédentes, seules considérées jusqu'ici. Son existence conduit à des conclusions d'une portée philosophique considérable, auxquelles nous arrivons maintenant : c'est peut-être ici que la théorie de la relativité a modifié le plus profondément les idées reçues, concernant la constitution de l'Univers.

22. — Equivalence de la masse et de l'énergie.

Depuis plus d'un quart de siècle, on avait reconnu l'existence d'un certain lien entre les phénomènes de radiation et les manifestations de l'inertie ou de ses cas particuliers, le poids et la pression.

Maxwell, en 1873, puis Bartoli, par une voie différente, avaient établi que toute radiation (chaleur, lumière, électricité, etc.) agit à la façon d'un projectile, en exerçant une pression de recul sur sa source, et une pression en avant sur le corps qu'elle rencontre et qui l'absorbe ou la réfléchit.

D'autre part, J.-J. Thomson a montré en 1881 que, quand un corps est électrisé, son inertie se trouve augmentée. A une certaine charge électrique correspond donc un supplément déterminé de masse, la *masse électro-magnétique*, que l'on qualifiait prudemment de « masse fictive », ou « apparente » ; mais qu'est-ce qu'une masse fictive qui a toutes les propriétés de la masse, sinon une véritable masse ?

Or donc, en partant des équations de Maxwell, Einstein a montré que *l'énergie totale d'un corps est égale au produit de la masse de ce corps par le carré de la vitesse limite* (vitesse de la lumière).

Cette proposition est tout à fait générale en ce qui concerne les variations de la masse. Si le corps est en repos pour l'observateur, il s'agit de la masse au repos, ou masse proprement dite (voir paragraphe 20). S'il est en mouvement, c'est la masse d'inertie, plus grande que l'autre, qui entre dans la formule. L'énergie totale est donc augmentée, d'une quantité égale (en première approximation) à l'énergie cinétique newtonienne : cette énergie cinétique a pour définition véritable d'être *l'accroissement que l'énergie totale reçoit par le fait du mouvement relatif.*

La valeur de l'énergie totale appelle plusieurs remarques de première importance.

1° Dans un état de mouvement donné, l'énergie totale d'un corps ne dépend que de la masse de celui-ci, non de sa composition chimique ou de son état physique. Solide ou gazeux, combustible ou non, chimiquement stable ou explosant au moindre choc, un gramme de matière contient la même quantité d'énergie.

Autrement dit, la masse et l'énergie sont équivalentes, à un coefficient numérique près. Par analogie avec l'équivalent mécanique de la chaleur, nous dirons qu'il existe un *équivalent mécanique* (ou *énergétique*) *de la masse* (ou *de l'inertie*), et que son inverse est *l'équivalent d'inertie* (ou *équivalent gravifique*) *de l'énergie.*

2° L'équivalent mécanique de la masse, c'est-à-dire la quantité d'énergie contenue dans l'unité de masse, est énorme. Un gramme-masse d'une matière quelconque équivaut en effet à 9 280 milliards de kilogrammètres ; c'est de quoi élever à 928 mètres un poids de 10 millions de tonnes, soit la consommation annuelle de blé de la France entière ; ou encore, de quoi hisser la Tour Eiffel, qui pèse 9 000 tonnes, à 1 030 kilomètres, 214 fois l'altitude du Mont-Blanc !

Si l'on transforme cette énergie en chaleur, on trouve qu'elle équivaut à 22 milliards de grandes calories, correspondant à la combustion de plus de 3 millions de kilogrammes de houille ; la consommation annuelle de la France, 60 millions de tonnes, équivaut donc à l'énergie totale de 20 kilogrammes d'une matière quelconque ; et l'on voit que l'énergie de combustion du charbon, dont nous ne savons d'ailleurs utiliser qu'une partie, n'est elle-même qu'une fraction infime de son énergie totale : à peine un trois-milliardième.

3° L'évaluation ci-dessus est celle de l'énergie totale du corps ; et il est à remarquer que les auteurs qui ont écrit sur la relativité la confondent avec son énergie disponible, ou potentielle, qui n'en est que la moitié.

Un corps au repos est, en effet, un système dans lequel un certain nombre de forces, déterminant autant d'énergies potentielles, se font équilibre. Une certaine somme d'énergies potentielles y est donc employée à en neutraliser une autre, équivalente. On peut faire apparaître une de ces deux sommes, en la transformant, par exemple, en énergie cinétique ; mais pour cela, il faut la libérer en faisant intervenir une troisième, équivalente, qui neutralisera celle qui, auparavant, retenait la première captive. Finalement, il n'y a de disponible que la moitié de l'énergie totale définie par Einstein ; et c'est déjà une quantité prodigieuse ; 4 640 milliards de kilogrammètres ou 11 milliards de calories, par gramme de matière !

On arrive à cette réduction du chiffre d'Einstein en interprétant, à la lumière des théories modernes sur la vitesse limite, les travaux que Gustave Le Bon a poursuivis de 1896 à 1904 sur la dissociation de la matière. On conçoit en effet que la plus grande quantité d'énergie que l'on puisse tirer d'un corps est celle qui correspond à la projection de ses éléments dans l'espace avec la plus grande vitesse qui soit réalisable : quantité représentée précisément par le *demi-produit* de la masse par le carré de la vitesse limite.

4° Si l'on pouvait dissocier les atomes et en projeter les éléments de la manière qui vient d'être dite, c'est-à-dire en fournissant à la matière une quantité d'énergie égale à celle qu'on libèrerait, il semble qu'on réaliserait une opération blanche : à quoi bon dépenser 100 pour récolter 100 ?

Mais d'abord, même une telle opération peut être avantageuse à accomplir. Que dis-je ? Elle serait exceptionnellement avantageuse, car il n'existe pas de transformation industrielle dont le rendement approche seulement de l'unité ; toujours, on dépense une certaine énergie pour en développer une moindre, mais qui est fournie sous une forme convenant mieux au but poursuivi. Il est donc probable que, pour développer l'énergie intra-atomique, on devra dépenser une quantité prodigieuse d'autre énergie : d'après le professeur Béhal, il faudrait pour démolir un atome, pouvoir l'attaquer par un courant électrique de quatre millions de watts.

Mais d'autre part, il est permis d'espérer qu'en exploitant certaines resources naturelles, on pourra trouver quelque moyen de déclencher cette énergie à moins de frais. Nous sommes au début de l'ère de la radio-activité : les rayons uraniques ont été découverts par Henri Becquerel en 1896, et le radium par les deux Curie en 1899. Maintenant que nous possédons des corps qui se dissocient spontanément, en émettant un véritable bombardement de particules douées de violentes propriétés destructrices, on peut penser à s'en servir pour amorcer la dissociation de corps moins rares. Cette façon de faire, comparable dans une certaine mesure à l'emploi d'un détonateur pour déterminer une explosion, fournirait à l'humanité des moyens d'action d'une puissance inimaginable.

Nous n'en sommes pas encore là. Bornons-nous, pour le moment, à émettre le vœu que ces recherches aboutissent, et que les hommes en appliquent les résultats, non à s'entre-détruire, mais à s'entr'aider dans leur lutte solidaire contre les forces hostiles de la nature !

5° Si la remarque qui précède est celle qui séduit le plus l'imagination en raison des possibilités illimitées qu'elle fait entrevoir à l'industrie humaine, la première, celle qui pose l'équivalence de la masse et de l'énergie, est de beaucoup la plus importante pour le philosophe.

On sait que l'énergie, c'est-à-dire le travail accumulé, la capacité de fournir du travail, se présente sous les formes les plus variées ; et, sous toutes ces formes, elle influe directement sur la masse des corps, sur cette grandeur que l'on supposait rigoureusement invariable. Chauffer un corps, l'éclairer, l'électriser, c'est augmenter son énergie totale, et nous savons maintenant que cela revient à augmenter sa masse, à *le rendre plus pesant*. Inversement, s'il émet de la chaleur, de la lumière, de l'électricité, son énergie totale décroît, il perd de sa masse, il pèse moins. Le tout, suivant une proportion bien déterminée. Autant dire que les diverses formes de l'énergie équivalent à des masses additionnelles dont un corps peut se charger ou se décharger ; autant dire qu'elles se transforment en masses, et réciproquement.

En parlant ainsi, on ne fait aucune hypothèse sur l'essence des choses, aucune incursion dans le dédale de la métaphysique. Peu nous importe de savoir « ce que sont » la matière et l'énergie. Mais ce qui nous importe grandement, et que nous savons aujourd'hui, c'est que ces deux concepts se pénètrent l'un l'autre, bien mieux, qu'ils se confondent. Or, c'est là une nouveauté capitale.

Jusqu'ici, en effet, on répartissait tout ce qui constitue l'Univers en deux catégories essentiellement distinctes, irréductibles l'une à l'autre, séparées par une cloison étanche : la matière, caractérisée par l'existence de sa masse, et l'énergie, impondérable ; et les métaphysiciens se posaient le problème ardu de savoir comment le pondérable et l'impondérable peuvent bien agir l'un sur l'autre.

On avait noté d'ailleurs ce fait remarquable que les corps dits matériels, tous caractérisés par l'existence de la masse, pouvaient se ramener à un certain nombre d'éléments irréductibles entre eux, et impérissables ; tandis que l'énergie, également indestructible, se manifeste sous une multitude d'aspects, tous convertissables l'un en l'autre.

Mais voici que la cloison étanche est renversée. Pour la commodité du langage, nous continuons bien à employer les mots « matière » et « énergie ». Mais nous savons que la distinction, entre eux, est purement quantitative, et ne tient qu'à la prédominance momentanée de l'effet de masse ou de l'effet d'énergie. Nous disons qu'il y a matière, lorsque nous percevons un effet de masse, ce qui est notre manière de percevoir l'existence d'une énorme accumulation d'énergie latente, ou potentielle ; et nous disons qu'il y a production d'un phénomène d'énergie, lorsqu'une portion de cette énergie latente, c'est-à-dire une masse extraordinairement diluée est transportée d'un corps à un autre. Bref, la masse n'est plus qu'un nouvel aspect de l'énergie, son aspect d'extrême condensation à l'état potentiel ; il n'existe plus, dans l'Univers, deux entités distinctes, mais *une substance unique, capable de se manifester sous divers aspects transmutables entre eux, parmi lesquels se trouve la propriété appelée masse ou inertie* (1).

***

Cette conception, si belle dans sa simplicité, nous amène à reviser plusieurs lois naturelles importantes.

Je ne citerai que pour mémoire la loi de la conservation des quantités de mouvement, qui est indifférente aux lecteurs non familiarisés avec les éléments de la mécanique rationnelle. Elle dérive directement de la loi newtonienne de l'égalité entre l'action et la réaction, laquelle contenait l'hypothèse inadmissible de la transmission instantanée des efforts. Elle a été mise au point par Poincaré.

Ce qui est à mentionner ici, à titre de haute généralisation résultant immédiatement de l'équivalence de la masse et de l'énergie, c'est que deux grandes lois distinctes, qui étaient à la base de la chimie et de la thermodynamique viennent se fondre en une seule. Je veux parler de la *loi de la conservation de la matière*, posée par Lavoisier sous la forme : « le poids d'un composé est égal à la somme des poids des composants », et qu'on énonce souvent : « rien ne se crée, rien ne se perd », et la *loi de la conservation de l'énergie*, qui lui fait pendant, et qui a déjà été mentionnée plus haut.

En effet, ce qui se conserve, dans une réaction chimique, ce n'est pas la masse totale des corps en présence, mais la somme algébrique de cette masse et des énergies dégagées ou absorbées sous forme de chaleur, électricité, lumière,

(1) Notons encore une remarquable analogie avec les transformations de l'énergie : la radio-activité nous fait entrevoir maintenant que les « éléments » chimiques ne seraient pas irréductibles, mais transmutables.

mouvement, etc. Ces énergies représentent une masse infime, qui devait nécessairement échapper à la balance des chimistes. En combinant 2 grammes d'hydrogène à 16 grammes d'oxygène, disent-ils, on obtient 18 grammes d'eau. Cela n'est pas strictement exact ; car la réaction dégage une certaine quantité de chaleur, c'est-à-dire d'énergie, qui équivaut à une certaine masse dissipée dans les parois du vase et dans l'atmosphère. Mais tout compte fait, on trouve que le déficit est de 5 milliardièmes du poids annoncé, soit de 9 cent millièmes de milligramme, alors que nos meilleures balances n'apprécient que le dixième de milligramme ; il faudrait former 200 tonnes d'eau pour que la perte atteignît un gramme, et cela ne serait évidemment pas vérifiable.

Ainsi, l'imperfection de nos moyens de mesure masque la loi véritable, en raison de la petitesse des variations de la masse ; et les deux lois de Lavoisier et de Carnot-Mayer restent distinctes en première approximation. Mais à un degré supérieur de précision, elles se fondent en une seule, et il faut dire : *l'inertie et l'énergie sont deux aspects de la substance qui constitue l'Univers ; leur somme est constante.* (1).

---

(1) Je ne veux pas quitter ce sujet sans donner encore quelques évaluations qui sont de nature à intéresser le lecteur en précisant ses idées.

J'ai dit qu'un corps échauffé est plus lourd qu'à froid. Mais la différence est petite. Pour porter une certaine quantité d'eau de 0° à 100°, il faut lui faire absorber une quantité de chaleur qui, transformée en énergie, puis en masse, équivaut à 5 trillionièmes de la valeur primitive ; c'est-à-dire qu'il faudrait porter 200 000 tonnes d'eau à l'ébullition pour déterminer une augmentation de poids d'un gramme (bien entendu, dans un vase clos — de 200 000 mètres cubes ! — pour empêcher toute évaporation).

D'autre part, j'ai parlé de la pression de radiation : par exemple, les rayons solaires exercent une pression sur la Terre. Au total, l'effet semble considérable : il est, d'après Poynting, de 70 000 tonnes. Mais cette pression, répartie sur toute la surface terrestre, se réduit à un dix-neuf milliardième d'atmosphère, un demi-milligramme par mètre carré.

Si faible que soit cette action, elle suffit, d'après Lebedef, à expliquer la formation de la queue des comètes. Elle s'exerce en effet en sens inverse de la gravitation, et elle est proportionnelle à la surface du corps frappé, tandis que la gravitation est proportionnelle à la masse, c'est-à-dire au volume. Si l'on considère des corps de rayon de plus en plus petit, le premier effet décroît donc comme le carré du rayon, et le second comme son

23. — Sur la réalité des grandeurs et l'appréciation de la vitesse relative.

Une question est infailliblement posée par quiconque débute dans l'étude de la relativité : les variations résultant du mouvement relatif sont-elles réelles, ou ne devons-nous y voir que des illusions de nos sens ? — La question, à vrai dire, est oiseuse ; mais encore faut-il savoir y répondre.

Pour cela, il faut commencer par s'entendre, sinon sur le sens du mot « réel », du moins sur son application aux résultats de nos mesures.

Qu'on ne s'y trompe pas : nous continuons à nous garder de toute métaphysique. Nous ne nous posons pas la question de la réalité du monde sensible : il nous suffit de considérer que, pour nous, les choses se passent comme si le monde sensible était réel et composé de grandeurs mesurables. Mais, cela étant, nous venons d'apprendre que, toutes autres choses étant supposées égales, les résultats de nos mesures varient selon l'état de mouvement relatif de l'objet mesuré et du système de repère.

Ainsi donc, lorsque deux observateurs ne sont pas dans le même état de mouvement par rapport à un phénomène, ce qui est évidemment le cas général, ils en évaluent différemment les éléments mesurables, longueurs, temps et masses. Qui peut les départager, et dire laquelle de leurs mesures correspond vraiment à la « réalité » ? Un troisième observateur ? — Certainement non. Car si celui-ci est solidaire d'un des deux premiers, il dira comme lui, et contredira l'autre ; et s'il est en mouvement par rapport à tous

---

cube, c'est-à-dire plus vite. A la distance où nous sommes du Soleil, la pression de radiation est égale à la gravitation pour une sphère de 3 dix-millièmes de millimètre de diamètre ; elle l'emporte pour une sphère plus petite, qui est donc repoussée par le Soleil, et non attirée.

Enfin, quand nous disons que l'énergie possède une masse, cela ne signifie pas que son poids soit mesurable au moyen de nos balances. Par exemple, Eddington a calculé que, si l'on vendait l'électricité au poids, suivant un tarif correspondant au prix de l'hectowatt à Londres, elle reviendrait à près de 8 milliards de francs-or le kilogramme ; cela indique qu'un kilogramme d'électricité représente une jolie quantité de courant !

deux, il énoncera une troisième série de nombres, et contredira les deux adversaires à la fois.

La conclusion est qu'ils ont tous deux raison ; que leurs mesures discordantes ont même droit à la qualification de réelles ; que, finalement, toute mesure, toute dimension, est relative, comme dépendant de l'état de mouvement de l'observateur et de ses repères par rapport à l'objet mesuré. Cet objet n'a pas une longueur unique, réelle, objective ; il a autant de longueurs différentes qu'il peut exister d'observateurs ayant, par rapport à lui, des vitesses différentes. Tout ce qu'on peut dire, c'est qu'il a une certaine *longueur maximum*, et une *masse minimum*, qui sont celles qu'on lui attribue quand on le rapporte à un système de repère immobile par rapport à lui. De même, on peut légitimement attribuer à un phénomène une infinité de durées différentes, parmi lesquelles il en existe une *minimum*, celle que fournit une montre immobile par rapport au lieu du phénomène.

Mais ces caractéristiques maximum et minimum ne sont pas plus « réelles » que les autres. Le diamètre du Soleil, si nous le rapportons à un axe pris sur Terre, a 7 mètres de moins que pour un observateur hypothétique qui le mesurerait sur place ; un habitant de la Lune le trouverait différent. Evidemment, on pourrait dire que le diamètre maximum, mesuré sur place, est privilégié par rapport aux autres, et que nous devrions le considérer comme réel, et nous en tenir à lui. Seulement, si nous voulions rapporter ainsi chaque corps à des axes liés à son mouvement, nous n'en sortirions pas. Il nous faut évidemment un système unique de coordonnées. Nous obtiendrons ainsi des valeurs qui seront comparables entre elles, au moins en ce sens qu'elles sont mesurées à une même échelle ; et pour nous, elles sont réelles, au même titre que n'importe quelle autre de nos impressions du monde extérieur.

***

Quand on applique à une question de relativité le langage précis et concis des mathématiques, il y faut assurément bien de l'attention ; mais encore est-on guidé par des notations qui excluent toute ambiguïté, et qui vous préservent de certaines erreurs (mais pas toujours, ainsi qu'on verra au paragraphe 34). Mais si l'on cherche à présenter ces choses en langage courant, le problème le plus simple entraîne d'incroyables difficultés d'exposition ; c'est très justement qu'Émile Picard rappelait dernièrement qu' « il y a des cas où il est plus facile d'apprendre les mathématiques que de s'en passer ».

Une dangereuse pierre d'achoppement est qu'on se trouve constamment exposé à laisser perdre de vue que les observateurs en présence doivent opérer chacun dans son système, et dans les mêmes conditions. En langage mathématique, impossible de s'y tromper ; une lettre désigne une grandeur rapportée aux repères de l'un des observateurs, et la même lettre, accentuée, est affectée à la mesure de la même quantité dans l'autre système. Mais en langage courant, on ne peut pas répéter indéfiniment les mêmes indications fastidieuses ; et si le lecteur (et même parfois l'auteur !) oublie qu'elles sont sous-entendues, on arrive au malentendu et à la confusion complète.

Par exemple on écrivait récemment : « Le temps, exprimé en secondes, que met un train à passer d'une station à une autre est plus court pour les voyageurs du train que pour moi qui le regarde passer ». Eh bien, l'auteur juxtapose ici deux opérations non comparables entre elles. Si en effet je suis à terre, et que, grâce à des signaux convenables, je constate (à ma montre) que le train a mis *tant* de secondes à parcourir une longueur connue (piquetée le long de la voie), j'ai opéré correctement, dans mon système. Mais si, dans le train, vous chronométrez les mêmes passages (sur votre montre, solidaire du train), en acceptant pour bonne la distance qui est donnée dans mon système, et non dans le vôtre, vous faites une opération incohérente, non comparable à la mienne. En poursuivant le raisonnement cité, on arriverait à conclure que les deux opérateurs s'attribueraient des vitesses relatives différentes, ce qui serait un non-sens. Au reste, l'auteur émet un peu plus loin cette assertion étrange : « La distance dans le temps et la distance dans l'espace diminuent toutes deux en même temps (*sic*) lorsque la vitesse de l'observateur augmente, et augmentent toutes deux (*sic*) quand la vitesse de l'observateur diminue ». La vérité est que l'une augmente et l'autre diminue, et encore faut-il avoir soin de noter que c'est seulement aux yeux de l'observateur considéré comme étant au repos.

Je viens de faire allusion à la vitesse relative des deux observateurs ; essayons donc de la faire mesurer par eux au moyen d'opérations qui soient comparables entre elles. Pour cela, il faut, à toute force, que chacun opère exclusivement dans son système.

Par exemple, nous commencerons par régler nos montres, et nous marquerons, d'accord, c'est-à-dire, pendant que le train stationne, une même longueur sur ce train et sur la voie ; mettons 300 mètres. Puis, une fois le train lancé, je compterai (à ma montre) le temps qu'un de ces points, l'avant ou l'arrière, met à franchir les 300 mètres piquetés sur la voie. Si je trouve 10 secondes, je dirai que la vitesse du train par rapport à moi est de 30 mètres par seconde. De votre côté, vous compterez (à votre montre) le temps qu'un point marqué sur le sol met à défiler devant la longueur de 300 mètres marquée sur votre train. Les longueurs ont été mesurées avec le même mètre, les montres sont identiques ; chacun de nous, dans son système, voit les longueurs inchangées, et a pleine confiance dans la marche de sa montre ; finalement, nous énoncerons, chacun de son côté, la même vitesse relative, soit 30 mètres par seconde.

C'est seulement quand l'un de nous essayera de vérifier le travail de l'autre, que le désaccord éclatera. Je vous dirai : « Mais non, mon ami ; vous vous trompez en énonçant le même résultat que moi. La longueur marquée sur votre train, et que je vérifie à mes repères, a maintenant moins de 300 mètres ; et il vous a fallu plus de temps que vous ne croyez pour la parcourir, car votre montre s'est mise à marcher plus lentement qu'avant votre mise en route. Recommencez vos mesures avec plus de soin, vous devez trouver une vitesse supérieure à celle que je mesure. » — Et naturellement, vous me tiendrez le même langage.

Ce cas bizarre est unique ; c'est celui de la vitesse relative des deux systèmes, qui, par définition, est la même (au signe près) pour les deux observateurs. Le cas où ils attribueront à un même mobile des vitesses différentes est celui d'un corps qui se déplace *dans un des deux systèmes*, et dont on rapporte le mouvement tantôt à l'un, et tantôt à l'autre des systèmes de repère.

Voici, par exemple, un voyageur qui marche dans le couloir de votre train, vers la machine, à la vitesse de 1 m, 50 par seconde (vitesse mesurée par vous, par rapport au train). Si je rapporte son mouvement à mes repères, liés au sol, je trouverai que sa vitesse, par rapport au train, est inférieure à 1 m, 50. Pour fixer les idées, je la suppose égale à 1 m, 45 (en réalité, la réduction serait beaucoup moindre). La vitesse relative du voyageur, par rapport à moi, sera 31 m, 45 par seconde, et non 31 m, 50, comme on le croyait jusqu'ici, et comme vous pourriez être tenté de le dire en ajoutant simplement 1,50 à 31. Mais lui-même trouvera comme moi la valeur 31, 45 ; car, étant en mouvement dans le train, il ne peut pas employer pour cette mesure les repères que nous y avons tracés ; il devra se servir d'un système de repère qui parcoure, comme lui, 1 m, 50 par seconde dans le train. Vous même, d'ailleurs, si vous opérez correctement, c'est-à-dire si vous appliquez la formule de transformation lorentzienne, vous trouverez comme nous la vitesse de 31, 45 m/sec.

Tout cela, qui n'a pas besoin d'être dit quand on emploie les notations mathématiques, montre quelle attention est nécessaire quand on veut s'en passer.

Voici un autre exemple de confusion, qui a fait couler beaucoup d'encre : c'est la boutade, ou l'image malencontreuse, par laquelle Langevin a dit qu'en voyageant avec une vitesse inférieure d'un vingt-millième seulement à celle de la lumière, on ne vieillirait que de deux ans, tandis que notre monde en vivrait deux cents ; de sorte qu'au retour, un homme, à peine changé, trouverait en vie les petits-fils de ses petits-fils.

Or, l'idée même de la relativité veut que les situations des systèmes mobiles soient permutables. Aux yeux de ce voyageur, c'est donc lui qui resterait immobile, et notre monde qui parcourrait 299 985 kilomètres par seconde ; et c'est nous qui vieillirions cent fois moins vite que lui. Mais cette contradiction n'est qu'apparente, et tient à une mauvaise position de la question. La relativité restreinte ne concerne les corps que *pendant* qu'ils sont en mouvement uniforme. Ici, pour quitter la Terre, puis pour s'arrêter et revenir, notre homme a subi deux accélérations. Ce cas, analogue à d'autres cités au paragraphe 34 et à l'appendice, entraîne de tout autres phénomènes.

On ne saurait donc insister trop sur la nécessité d'exprimer explicitement les données de chaque problème, si fastidieux que cela soit ; mieux vaut fatiguer le lecteur par des répétitions que de l'induire en erreur.

Il peut être plus expéditif de dire que, dans le système mobile, les durées sont allongées, les longueurs raccourcies, et les masses augmentées. Mais ce langage elliptique tend à faire croire que, quand deux systèmes sont en mouvement relatif, les grandeurs sont modifiées dans l'un et restent inchangées dans l'autre, ce qui établirait une distinction essentielle entre ces deux systèmes, et serait donc en contradiction avec le principe de relativité. Ce qu'il faut comprendre, et qu'il faudrait répéter à chaque phrase, c'est que, pour chaque observateur, les phénomènes, étudiés dans son système, c'est-à-dire rapportés à des axes solidaires de son mouvement, restent inchangés ; mais que s'il rapporte ainsi à ses repères un phénomène que l'autre a rapporté aux siens, les résultats sont discordants, suivant un rapport fourni par les formules de transformation. Et, bien entendu, cette remarque ne s'applique pas à la vitesse relative des deux systèmes, qui est un phénomène commun à ces systèmes, servant précisément à les distinguer et à définir les formules de transformation.

Cela peut être sous-entendu dans beaucoup de cas ; mais pour plus de sûreté, il convient de le répéter de temps à autre, quitte à fatiguer un peu le lecteur. Une fois que celui-ci en sera bien pénétré, il ne posera plus la question de la réalité des contractions. Il comprendra que le mètre que je tiens en main est *réellement* long de 1 mètre (pour moi) ; qu'il en est de même (pour vous), de celui que vous emportez dans votre train ; et que, pour chacun de nous, le mètre de l'autre est *réellement* long de moins d'un mètre !

24. — La quatrième dimension... et les suivantes.

C'est une terrible affaire, que de prononcer devant des profanes les mots de « quatrième dimension », ou de « géométrie à quatre dimensions », — heureux quand on ne parle pas de géométrie à *n* dimensions ! Il y a là un parfum de mystère qui séduit et égare les uns, et qui épouvante et indigne les autres.

Dès l'enfance, en effet, nous avons appris que tout se mesure suivant trois dimensions perpendiculaires deux à deux : longueur, largeur, hauteur, qui sont visibles et palpables. Lors donc qu'on entend pour la première fois parler d'une quatrième dimension, perpendiculaire à chacune des trois premières, on cherche à la voir, à la toucher ; naturellement, on n'y parvient pas ; et l'on crie, soit au miracle, à la magie, soit à l'absurdité.

Ce n'est ni l'un ni l'autre. Il s'agit d'une notion, assurément abstraite, mais qui est fort claire, à la condition que, précisément, on ne cherche pas à se la représenter comme quelque chose de visible et de palpable ; et je compte bien en faire concevoir l'esprit général au lecteur complètement étranger à l'algèbre et à la géométrie supérieure.

L'idée d'une quatrième dimension, et même d'un nombre quelconque de dimensions en sus des trois premières, n'est qu'une de ces généralisations, si fréquentes en mathématiques, dont l'audace peut étonner au premier abord, mais qui sont fécondes en résultats positifs, par les rapprochements qu'elles suggèrent entre faits qui apparaissent d'abord comme absolument distincts et capricieux.

Voici d'abord quelques autres exemples de ces généralisations.

L'idée de nombre, dans sa pureté primitive, a commencé par s'appliquer aux quantités *discrètes*, c'est-à-dire composées d'unités physiquement distinctes : une pomme, deux pommes, trois pommes... Les nombres ont donc été, au début, essentiellement entiers ; l'introduction des nombres fractionnaires fut une première généralisation.

Mais coupons un objet en trois parties égales,... ou, pour parler plus modestement, en trois parties ne présentant pas de différences que nous ayons le moyen de constater. Chacune d'elles sera le tiers de l'objet primitif. Idée bien simple : la fraction « un tiers ». Mais essayons de traduire cette idée en langage décimal, et nous trouvons l'expression 0,333... ; et, après ces nombres étranges, les *fractions continues*, nous rencontrons les *nombres incommensurables*, soit, par exemple, que nous voulions calculer la diagonale du carré en fonction du côté, soit que nous cherchions la longueur d'une circonférence de cercle par rapport au diamètre (1).

Or, ces nombres qui ressemblent si peu à ce qu'on appelle les nombres naturels, c'est-à-dire aux entiers, on leur applique les mêmes règles de calcul : par exemple, on peut être amené à élever un nombre incommensurable à une puissance incommensurable, opération que le débutant ne laissera pas de trouver déconcertante.

A propos de ces généralisations, il serait indiqué de parler aussi des *imaginaires*. Mais cela conduirait à des développements qui ne sauraient trouver place ici. Il suffira, pour l'objet que nous poursuivons, de remarquer que, tout en donnant à ces quantités un nom qui les présente comme de simples vues de l'esprit, on est prêt à les voir intervenir dans tout calcul algébrique, on les traite de la même manière que les quantités dites réelles, et l'on tire de leur emploi des résultats positifs que l'on n'aurait pas obtenus sans

---

(1) Il n'est pas inutile de rappeler que c'est tout à fait improprement qu'on emploie le mot « incommensurable » dans le sens d' « énorme ». Il signifie qu'une quantité n'a pas de commune mesure avec l'unité ; mais une semblable quantité peut être aussi petite qu'on voudra.

elles, ou qu'on n'aurait obtenus que beaucoup plus difficilement. Elles interviennent d'ailleurs directement dans l'application de la géométrie à quatre dimensions à la théorie de la relativité.

***

Ce qui rend si étrange l'expression « géométrie à quatre dimensions », c'est que le mot « dimension » a plusieurs significations autres que l'originelle, qui se rapporte à la mesure de l'espace ; et précisément, dans cette géométrie particulière, il prend un sens qui n'est pas proprement géométrique, mais algébrique. Pour le comprendre, il faut se reporter à une science dont je ne veux pas prononcer le nom, de crainte d'effaroucher le lecteur, avant d'avoir montré à celui-ci que depuis longtemps il la pratique sans s'en douter, comme monsieur Jourdain faisait de la prose.

Tout lecteur de journal, c'est-à-dire tout homme qui sait lire, est habitué, de nos jours, à voir représenter des statistiques, ou la marche d'un phénomène naturel, au moyen de graphiques. On mesure une grandeur qui dépend d'une autre, ou, comme on dit en mathématiques, qui *varie en fonction d'une autre*, ou, plus brièvement, qui *est fonction* de cette autre : ce sera, par exemple, la population, la production ou le commerce d'un pays, année par année, ou encore les variations de son change, d'un jour à l'autre, ou d'une semaine, d'un mois à l'autre. On quadrille une feuille de papier, et, sur un bord du cadre, on porte les dates successives, tandis que le bord contigu sert d'échelle à la quantité dont on observe les variations (*fig.* 7). Chaque valeur observée est figurée par un point, dont ces deux échelles déterminent la position. On relie enfin ces points par une courbe continue, qui équivaut à tout un tableau de chiffres, et qui est beaucoup plus facile à consulter et à commenter. Chacun, même s'il ne connaît pas ces expressions, sait *interpoler*, c'est-à-dire intercaler une valeur vraisemblable I, non observée, entre deux valeurs réellement fournies par l'observation, et *extrapoler*, c'est-à-dire prolonger hypothétiquement la courbe dans un avenir pas trop éloigné, en un point E. Chacun, enfin, sait que, quand la courbe s'élève ou s'abaisse rapidement (*fig.* 8), il y a de grandes chances pour que la variation continue dans le même sens, et que, quand elle se rapproche de la direction

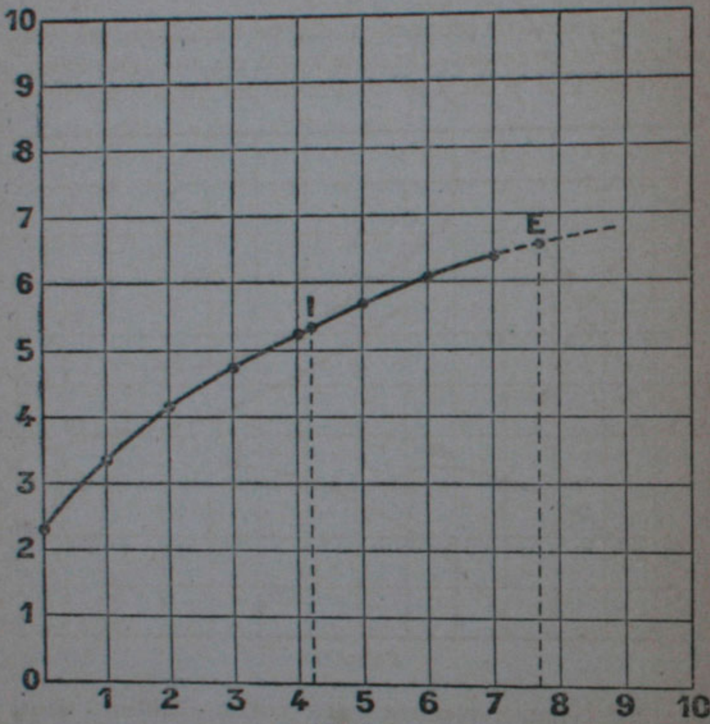


Figure 7.

horizontale, il est probable que la variable est sur le point d'atteindre un maximum M, un minimum *m*, ou un point d'inflexion I.

Le moment est venu de prononcer le nom devant lequel je reculais plus haut : ceux qui raisonnent ainsi, en « discutant » une courbe rapportée à deux axes, appliquent, sans s'en douter, les principes de la *géométrie analytique*, de cette fusion intime de l'algèbre avec la géométrie, qui constitue le véritable titre de Descartes à l'immortalité.

* * *

Or, la géométrie proprement dite ne connaît que les trois dimensions de l'espace ; et nous avons vu, au paragraphe 6, comment tout point y est déterminé par trois dimensions

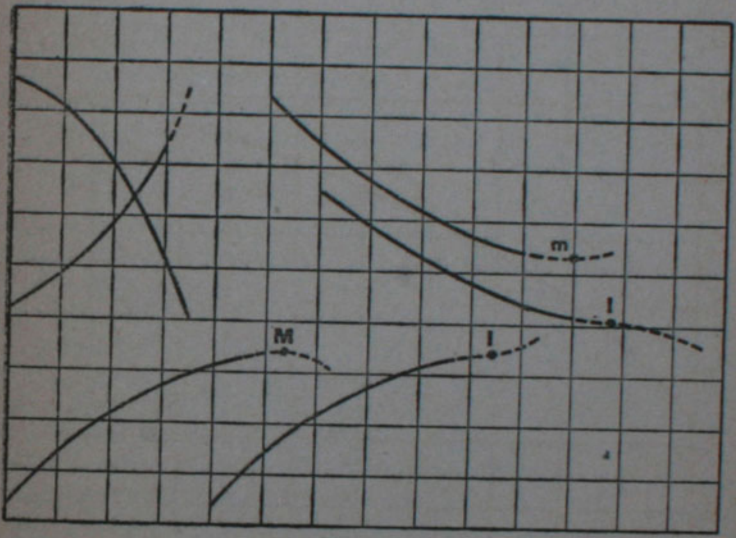


Figure 8.

exprimées numériquement (cette notion, d'ailleurs, était déjà du domaine de l'analytique).

Si nous considérons deux points sur une ligne, nous pouvons les prendre aussi voisins que nous voulons ; et, remarque importante, nous pouvons les prendre assez voisins pour que la différence entre leurs coordonnées de même nom soit « infiniment petite », ce qui signifie *aussi petite qu'on voudra*. Tel est précisément le cas des variables de l'algèbre ; et dorénavant, nous pourrons employer indifféremment les noms *variable* et *coordonnée*.

On voit que, quand on applique l'algèbre à la géométrie, on est amené à n'employer que des fonctions à trois variables, qui sont les trois coordonnées de chacun des points jouant un rôle dans le problème étudié ; les équations qu'on pose ne peuvent comporter que trois inconnues.

Or, un fait très important est l'étroite parenté qui unit des équations ayant même aspect et ne différant que par le nombre de leurs inconnues. Les graphiques des journaux portent des courbes tracées sur un plan, au moyen de deux dimensions seulement ; tel est, par exemple, le cas des points dont l'ensemble constitue un cercle. Mais considérons les points d'une sphère ; il faut trois dimensions pour définir chacun d'eux (si par exemple la sphère repose sur notre plancher, ses points ont des hauteurs différentes par rapport à lui) ; l'équation correspondant à une courbe qui relie de semblables points est donc à trois inconnues.

Ici se présente la parenté annoncée plus haut. On sait que la sphère possède de nombreuses propriétés en commun avec la circonférence de cercle : par exemple, tous ses points sont à égale distance du centre, ils sont symétriques deux à deux par rapport à lui, les tangentes sont perpendiculaires aux rayons, la courbure est constante; une portion d'un cercle ou d'une sphère peut donc s'appliquer sur une autre, etc. Ces analogies se traduisent algébriquement par ce fait, que les équations que l'on est amené à écrire à propos du cercle et de la sphère sont tout à fait pareilles ; elles ne diffèrent que parce que celle qui se rapporte à la sphère contient une troisième dimension, laquelle y entre exactement sous la même forme et dans les mêmes conditions que les deux premières. Biffez le terme qui contient une des trois dimensions, ou bien supposez que, pour le problème considéré, cette dimension reste constante, et il vous restera une équation qui se rapportera à un cercle. (1).

---

(1) [Par exemple, j'écris l'équation qui représente une sphère de 1 mètre de rayon reposant sur le plancher de ma chambre. Cela revient à écrire une équation exprimant que les trois coordonnées d'un point sont telles, que ce point soit à la distance de 1 mètre d'un certain point situé lui-même à 1 mètre au-dessus du plancher. Maintenant, remplaçons dans cette équa-

Autrement dit, les équations à trois variables « contiennent » celles à deux variables, comme l'espace géométrique, à trois dimensions, contient un plan, qui n'est qu'à deux dimensions.

Voici une comparaison qui peut aider à comprendre ces choses, à condition, bien entendu, de ne pas oublier le dicton : « Comparaison n'est pas raison ».

Considérons les mots *forme, nature, mort;* ce sont des radicaux exprimant chacun une idée simple, et, pour cette raison, je les appellerai ici des « mots à une dimension ». Ajoutons-leur un second élément, exprimant l'idée de manière d'être, et nous aurons une série de mots à deux dimensions, *formel, naturel, mortel.* Avec un troisième élément, signifiant que cette qualification s'applique, non à un substantif, mais à un verbe ou une proposition entière, nous obtenons les adverbes *formellement, naturellement, mortellement.* Et nous remarquons que chacune de ces trois séries de mots a un caractère commun, que chacune est contenue dans la suivante, et que les séries dérivées du même radical, comme *forme, formel, formellement* et *mort, mortel, mortellement,* présentent un parallélisme évident.

On peut aller plus loin. Le mot *immortellement* contient une quatrième dimension, et exprime la négation de celui dont il dérive. Mais comme notre langue résulte de l'évolution, et non d'un plan logiquement préconçu, elle n'est pas parfaite. Nous avons bien le mot *informe,* mais non les mots « informel » et « informellement », et nous n'avons même pas le mot « innature ».

L'algèbre, au contraire, est une langue parfaite, parce que construite suivant une théorie qui ne souffre aucune

---

tion la lettre z (par laquelle on est convenu de représenter la hauteur) par une valeur déterminée, soit 50 centimètres. Cela signifie que, de toute la sphère, nous ne considérons plus que les points situés à 50 centimètres du sol : nous avons coupé la sphère par un plan horizontal situé à cette hauteur, et l'équation qui nous reste est celle d'un cercle situé dans ce plan. Si, au lieu de z, nous avions posé la longueur x constante, nous aurions coupé la sphère par un plan parallèle à un mur, et il nous resterait l'équation d'un autre cercle.]

exception, aucun caprice. Un problème qui contient quatre inconnues, ou davantage, s'y pose et s'y traite donc de la même manière que celui qui n'en comporte qu'une, deux ou trois, et donne lieu à des équations qui ne se distinguent des autres que par l'intervention de nouvelles variables, traitées de la même manière que les précédentes. Autrement dit, à supposer que le mot « immortellement » soit une expression algébrique, le barbarisme « innaturellement » en serait une autre, tout aussi légitime, et jouant un rôle analogue (1).

Cela étant, on se trouvait naturellement conduit à raisonner comme il suit :

Une équation à trois variables, ou dimensions, exprime, avec quelque chose en plus, les mêmes propriétés qu'une équation à deux dimensions, laquelle n'en est qu'un cas particulier (obtenu en posant que la troisième dimension reste constante). Donc, on doit pouvoir interpréter une équation à quatre dimensions, construite semblablement à une autre à trois dimensions, comme représentant quelque chose d'analogue, l'équation à trois dimensions n'étant que son cas particulier (obtenu en posant que la quatrième dimension reste constante).

La géométrie à quatre dimensions n'est pas autre chose qu'une généralisation de ce genre, de caractère purement algébrique. Quand on étudie les formes des corps immobiles, on fait de la géométrie ; et si l'on traite celle-ci par l'algèbre, c'est-à-dire qu'on fasse de la géométrie analytique, on n'a besoin de considérer que les trois dimensions de l'espace, que l'on est convenu de représenter par les lettres x, y et z. Si l'on étudie le mouvement d'un point,

---

(1) [Sans rien savoir sur la signification des écritures qui suivent :

$$x^2=r^2,$$
$$x^2+y^2=r^2,$$
$$x^2+y^2+z^2=r^2,$$
$$x^2+y^2+z^2+w^2=r^2,$$

n'importe qui se rend compte qu'elles représentent des idées analogues, et que chacune d'elles implique le contenu des précédentes, avec quelque chose en plus.]

c'est-à-dire ses positions successives dans l'espace, on est obligé d'ajouter à ses trois coordonnées, qui définissent sa position à un instant donné, une quatrième variable, le temps *t*, qui précise l'instant où le point occupe cette position. On est donc conduit à écrire des équations à quatre inconnues ; et ces équations contiennent les précédentes, et s'y ramènent dans certains cas particuliers.

Considérons, en effet, une semblable équation, et fixons-y le temps à un instant déterminé, en attribuant une certaine valeur à la dimension *t*. Il nous restera une équation à trois dimensions, signifiant qu'à cet instant déterminé, le point se trouve sur une certaine surface. Le problème a cessé d'être cinématique, pour devenir simplement géométrique.

25. — L'artifice de Minkowski.

Depuis longtemps, on est habitué à entendre dire que le temps est la quatrième dimension de l'espace. Déjà d'Alembert l'a écrit dans l'*Encyclopédie*, en 1754. Mais cette assertion, ainsi produite en termes vagues, n'a que la valeur d'une comparaison, d'une métaphore. Pour qu'elle ait un sens précis et utilisable, il faut que le temps soit compté d'une façon telle, que, dans les calculs, il puisse remplir exactement le même rôle que les trois dimensions de l'espace géométrique.

Une comparaison encore va nous aider ici.

Soit un terrain carré, mesurant 100 mètres de côté. Un enfant nous dira qu'il a 400 mètres de tour, et 10 000 mètres carrés de superficie ; et si un autre terrain carré mesure 100 pieds anglais de côté, notre jeune calculateur saura que son périmètre et sa superficie s'expriment, en pieds, par les mêmes nombres, résultant des mêmes opérations.

Mais supposons que nous fassions mesurer les deux côtés d'un rectangle par deux arpenteurs, un Français et un Anglais, et qu'ils trouvent respectivement 100 mètres et 83 yards, plus 2 pieds, 4 pouces et 7/16 de pouce. Nous ne pourrons pas additionner et multiplier des longueurs ainsi exprimées ; nous devrons commencer par effectuer un changement d'unité pour l'une des deux, afin de rendre les deux expressions comparables. Pour la facilité des calculs ultérieurs, nous réduirons l'expression anglaise en unités métriques, en multipliant ses termes par des coefficients convenables ; et nous aurons alors l'agréable surprise de constater que le côté mesuré par l'Anglais est long de 100 mètres, que le champ est carré, et que sa superficie est d'un hectare. Sous leur première forme, les renseignements recueillis étaient inutilisables ; il fallait commencer par les rendre compatibles.

Toujours sous réserve du dicton « Comparaison n'est pas raison », c'est un service du même genre que le mathématicien allemand Minkowski a rendu à la théorie de la relativité en 1908, un an avant sa mort prématurée.

On se souvient que la théorie a pour point de départ la nécessité de concilier deux faits expérimentaux, le principe de Galilée et la loi de Michelson. Or, quand on exprime algébriquement leur coexistence, on arrive à écrire une équation de condition à laquelle doivent satisfaire les coordonnées de tout point mobile, et qui contient donc les trois coordonnées d'espace et celle de temps. Seulement, cette équation présente la particularité que l'une des variables, celle de temps, y figure d'une autre manière que les trois autres. Si, pour reprendre l'exemple donné plus haut à propos d'une sphère, on y rend constante la variable de temps, on obtient l'équation d'une sphère ; mais, si l'on opère de même sur l'une des trois autres variables, on trouve autre chose, alors que, pour des raisons de symétrie qui ne peuvent être données ici, on devait s'attendre au même résultat. Il y avait là quelque chose d'irritant pour le mathématicien ; quelque chose qu'un musicien exprimerait en disant que, dans le quatuor des dimensions, un des instruments ne jouait pas dans le ton des trois autres.

Eh bien, Minkowski a accordé le quatrième instrument. Il a opéré un changement d'unité de temps, par la simple intervention d'un coefficient convenablement choisi, comme nous avons fait plus haut pour le résultat des opérations de l'arpenteur anglais ; et le temps, ainsi mesuré, est pour ainsi dire entré dans le droit commun ; il figure dans les équations de la relativité au même titre et dans les mêmes conditions qu'une quelconque des trois dimensions de l'espace ; ces équations sont désormais tout à fait analogues à celles de la géométrie cartésienne, puisqu'elles sont à quatre dimensions de même espèce.

Ces mots « de même espèce » sont assez arbitraires, car, en définitive, les espèces sont des catégories que nous créons pour la commodité de notre raisonnement. Un enfant sait, par exemple, que l'on peut additionner deux pommes et deux pommes, mais non deux pommes et deux poires, ni deux pommes et deux choux. Et pourtant, les dernières opérations sont possibles, à la condition de considérer d'autres catégories ; car deux pommes et deux poires font quatre fruits ; et si l'on remet au chemin de fer des sacs de pommes et des sacs de choux, la bascule est là pour nous dire combien nous apportons de kilogrammes de denrées végétales. Au reste, un écolier attentif pourrait faire quelque objection à l'idée d'additionner deux calvilles et deux reinettes. Aussi bien ai-je eu l'occasion de voir une population de Cafres dont la langue ne possède pas les mots génériques *canard* et *fourmi ;* ils ont des noms spéciaux pour désigner les canards blancs, noirs, bruns, etc., les fourmis petites, moyennes, grosses, brunes, noires, etc., et considèrent ces espèces comme aussi différentes les unes des autres que l'hippopotame du crocodile.

En résumé, on peut toujours trouver, entre deux objets, un ou plusieurs caractères communs, une sorte de commune mesure, permettant de les classer dans une même catégorie plus générale que celles où ils se rangent quand on ne les envisage pas spécialement sous cet aspect.

En physique, on est arrivé à établir un système de mesures qui rattache toutes les grandeurs à trois unités dites *fondamentales*, celles de longueur, de masse et de temps ; c'est le système *C. G. S.*, ou *centimètre-gramme-seconde*. Ainsi, l'on n'apercevait jadis aucun lien entre la chaleur et ces trois grandeurs ; mais on sait aujourd'hui que l'unité de chaleur équivaut à 425 fois celle de travail, ou d'énergie, qui est un composé de longueur, de masse et de temps.

Mais les trois unités fondamentales étaient restées, jusqu'à nos jours, rebelles à tout essai de rapprochement; on ne concevait entre elles aucune commune mesure.

Or, en considérant comme unité fondamentale une grandeur complexe bien déterminée, qui est la vitesse de la lumière dans le vide galiléen (1), Minkowski a fourni cette commune mesure. Par l'intermédiaire de l'idée de vitesse, qui implique par définition celles de longueur et de temps, nous pouvons évaluer une longueur par le temps que la lumière met à la parcourir, et un temps par le trajet qu'il permet à la lumière d'effectuer : nous pouvons dire que la distance de Brest à Toulon est d'un trois-centième de seconde-lumière, et qu'un train s'est arrêté pendant 90 millions de kilomètres-lumière, — soit cinq minutes.

A la vérité, cette notion, ainsi exprimée, n'est pas nouvelle — il y a longtemps qu'on évalue les distances astronomiques en parcours de la lumière —, et elle n'est donnée ici que pour illustrer tant bien que mal la parenté de la longueur et du temps. L'artifice imaginé par Minkowski fournit, entre ces grandeurs, une relation un peu moins simple (2).

[L'espace et le temps sont des *continus*, c'est-à-dire des grandeurs dans lesquelles on peut concevoir des intervalles aussi petits que l'on veut, ou, comme on dit en mathématiques, des intervalles *infiniment petits;* l'espace est un continu à trois dimensions, et le temps en est un à une seule dimension.

Ces deux continus sont inséparables, car, suivant le mot

---

(1) Pour la définition de ce terme de vide « galiléen » voir le paragraphe 26.

(2 [Je me bornerai à dire, pour les esprits curieux, que ce changement d'unité consiste à multiplier le temps par le produit de deux facteurs i et c, celui-ci étant égal à la vitesse de la lumière, et i désignant le symbole imaginaire « racine carrée de moins-un ». Le produit ic se trouve être l'*équivalent linéaire* du temps, et son inverse $1/ic$ est l'*équivalent chronométrique* de la longueur.]

de Minkowski, « personne n'a jamais vu un lieu autrement qu'en un certain temps, ni un temps autrement qu'en un certain lieu ». Mais ils ne sont pas seulement inséparables : la théorie de la relativité nous montre qu'ils sont fonctions l'un de l'autre.

Or, l'artifice de Minkowski a pour résultat de mettre ce fait en évidence, en effectuant une combinaison intime de l'espace et du temps, qui se fondent en un continu à quatre dimensions, auquel l'auteur a donné les deux noms d'*espace-temps* et d'*Univers*. On verra au paragraphe 35 que la seconde appellation n'est pas à conserver. Quoi qu'il en soit, son auteur en déduit, pour un événement quelconque, c'est-à-dire pour un groupe déterminé de quatre coordonnées d'espace-temps, le nom de *point d'Univers* ; et l'histoire d'un point matériel, c'est-à-dire sa course dans l'espace et le temps, est une *ligne d'Univers*. Enfin, il faut noter qu'au moyen des coordonnées de deux points d'Univers — autrement, au moyen des caractéristiques qui définissent deux événements dans l'espace et le temps — on forme une certaine grandeur appelée leur *intervalle*, et qui joue entre eux un rôle analogue à celui que la distance joue entre deux points de l'espace : de même que cette distance reste la même, quels que soient les axes de coordonnées auxquels on rapporte les deux points (§ 6), l'intervalle de deux points d'Univers ne dépend pas du système de repère qu'on a choisi ; c'est ce qu'on appelle un *invariant*. On est convenu de représenter cet intervalle par la lettre s.

On a vu au paragraphe 16 qu'il y a une limite à la possibilité d'action d'un phénomène sur un autre. Cette limite est mesurée par l'intervalle qui sépare les deux points d'Univers. Si la distance spatiale entre les lieux considérés est inférieure au chemin que la lumière parcourt pendant la durée qui s'écoule entre les deux événements, l'intervalle s est une quantité réelle, et l'interaction est possible ; au cas contraire, s est imaginaire, et il ne peut y avoir relation de cause à effet.]

Je n'insisterai pas davantage sur ces détails un peu ardus. Mon but était seulement de faire comprendre que le terme de « quatrième dimension », souvent prononcé sur un ton d'augure et non sans intention d'éblouir le public, ne signifie nullement que nos notions sur l'espace doivent être bouleversées par la naissance d'un monstre inconnu et indéfinissable, qui serait venu troubler la petite famille de nos trois dimensions traditionnelles. Ce terme est simplement une façon de parler très brève et très nette, par laquelle les mathématiciens expriment que certaines opérations algébriques, qui en généralisent d'autres, sont susceptibles de recevoir une interprétation ayant quelque analogie avec celles de la géométrie analytique, et de faciliter ainsi les raisonnements. De même que l'algèbre n'est qu'un langage abrégé, une sténographie du raisonnement, on peut dire que la géométrie à quatre ou à *n* dimensions est une sténographie de l'algèbre, une algèbre de l'algèbre. Mais qu'on n'y cherche pas de la géométrie à la façon d'Euclide.

Enfin, je reviendrai plus loin sur l'erreur que l'on a commise, en parlant, à la suite de Minkowski, d'un « Univers à quatre dimensions ».

CHAPITRE III

LA RELATIVITÉ GÉNÉRALISÉE

26. — Le principe d'inertie et l'espace galiléen.

Tout ce qui précède a été déduit du principe de Galilée, qui concerne le mouvement uniforme.

Or, le mouvement uniforme n'existe pas dans la Nature! Ou du moins, il n'y existe qu'à titre de première approximation dans l'étude que nous pouvons faire des mouvements réels, qui sont prodigieusement variés; c'est une limite, dépendant de nos moyens d'observation, une conception théorique. Strictement parlant, le principe de Galilée serait donc sans application possible.

Il y a là de quoi dérouter le lecteur, qui se demandera s'il n'a pas perdu son temps à nous suivre jusqu'ici. Mais nous allons le rassurer bien vite.

On conçoit bien ce qu'est un mouvement uniforme. C'est celui qui, pour l'observateur, ne change ni de direction, ni de vitesse, ce dernier terme signifiant qu'une même longueur est toujours parcourue dans le même temps. Mais on se rend moins facilement compte de la condition que suppose un tel mouvement.

Cette condition est exprimée dans un énoncé qu'on appelle le *principe d'inertie*, et qu'on attribue tantôt à Kepler, tantôt à Galilée, mais qui leur est bien antérieur : *Si un corps est au repos, il ne peut pas se mettre en mouvement sans l'intervention d'une force extérieure; et s'il est en mouvement, et qu'il ne subisse l'action d'aucune force extérieure, son mouvement est rectiligne et uniforme.*

Ainsi, le mouvement uniforme est celui d'un mobile qui, une fois mis en route (par l'effet, une fois produit, d'une certaine force), n'est plus soumis à l'action d'aucune force extérieure; car, si une telle force intervenait pendant un instant, elle modifierait la direction ou la vitesse; et, si elle agissait d'une manière continue, elle déterminerait un mouvement accéléré, dans lequel le chemin parcouru serait proportionnel, non plus au temps, mais à son carré. Si, au contraire, aucune force ne vient accélérer ou retarder le mobile, il continue indéfiniment sa route avec sa vitesse acquise.

Malheureusement, le principe d'inertie, qui figure encore en tête de tous les traités de mécanique, présente deux défauts, dont on appréciera la gravité.

En premier lieu, ainsi que Le Dantec l'a montré en 1904, ce prétendu principe n'existe pas en tant que principe; ce n'est qu'une définition retournée.

En effet, le mot « force » est simplement le nom générique que nous employons pour désigner toute cause de mouvement (ou, ce qui revient au même, toute cause de modification de l'état de mouvement). En posant le principe d'inertie après avoir défini la force, on ne fait donc qu'énoncer successivement les deux propositions suivantes :

1° Tout changement de l'état de mouvement est causé par quelque chose que nous appelons « force » ;

2° Si aucune force n'agit, c'est-à-dire s'il n'existe aucune cause de changement d'état de mouvement, l'état de mouvement ne change pas.

La Palisse lui-même aurait dit que c'est bonnet blanc et blanc bonnet.

Mais, en outre, ce fameux principe implique la réalisation d'une impossibilité physique évidente. Il est impossible de concevoir un corps qui ne soit soumis à aucune force extérieure. En admettant qu'il se déplace sans subir aucun frottement, aucune résistance, dans le vide absolu, il resterait encore soumis à la rencontre des radiations, qui se propagent dans toutes les directions, et surtout à l'action d'une force absolument universelle, la gravitation. Pour que le mouvement uniforme fût possible, il faudrait que l'Univers se réduisît à un seul point matériel; car s'il existait seulement un second point, tous deux graviteraient l'un vers l'autre; et encore, nous savons que, s'il n'existait qu'un point, l'idée même du mouvement ne pourrait pas exister, puisqu'elle est essentiellement relative et exige l'existence d'un point de repère!

Le mouvement uniforme n'est donc qu'une vue de l'esprit, au même titre que les figures parfaites de la géométrie.

A première vue, on peut s'étonner de cette assertion. Nous avons parlé, en effet, de trains roulant avec une vitesse constante, et cela, précisément sous l'action d'une locomotive, c'est-à-dire d'une force continue. Mais la moindre réflexion suffit à montrer que le rôle de la machine est de faire démarrer le train, puis de lui donner sa pleine vitesse, enfin d'entretenir le mouvement, en surmontant les frottements et résistances de toute nature. Le cas envisagé par Kepler et Galilée est plutôt représenté par une locomotive chargée d'envoyer une rame de wagons sur une voie de garage; elle imprime un choc au wagon de queue, et la vitesse ainsi communiquée se conserverait indéfiniment, si elle n'était bientôt absorbée et annulée par les frottements, qui sont fonctions du poids de la rame, et qui résultent donc, en dernière analyse, de la gravitation.

Ainsi, pour que le principe de Galilée fût strictement valable, il faudrait que nous pussions soustraire un corps à toute action extérieure, en particulier à la gravitation. Absolument parlant, cette hypothèse est un non-sens. Mais en pratique, dans la limite des approximations correspondant à nos moyens de mesure, elle est acceptable. En particulier, la gravitation s'exerce en rapport inverse du carré de la distance, et décroît donc rapidement quand celle-ci augmente, jusqu'à devenir insensible. Sur Terre, nous n'éprouvons aucun effet sensible de gravitation vers une étoile quelconque, bien que tout l'ensemble du système solaire soit entraîné dans l'espace par une influence qu'il n'a pas encore été possible de déterminer. Un mobile qui se trouve, dans le vide interstellaire, à une distance énorme de tout corps céleste, peut donc être considéré comme soustrait à toute action extérieure, et se déplaçant uniformément. Tel est notamment le cas des radiations électromagnétiques, dont la lumière est un exemple particulier.

Un semblable milieu, dans lequel le prétendu principe d'inertie et le principe de Galilée sont valables, est ce qu'Einstein appelle un *espace inertiel* ou *galiléen.*

Une fois de plus, nous sommes ici en présence de lois que la réalité physique réduit, par ses répercussions, à n'avoir jamais qu'un fonctionnement incomplet, c'est-à-dire de lois approchées, dont la valeur dépend des conditions de chaque problème particulier. Selon le cas, on pourra, ou non, admettre qu'un milieu est galiléen, c'est-à-dire que la gravitation ne s'y exerce pas sensiblement et que le principe de Galilée y est valable.

Par exemple, s'il existe un mouvement qu'on ne puisse pas qualifier d'uniforme, c'est bien celui de la Terre autour du Soleil; je ne parle pas seulement des variations de direction et de vitesse du centre de gravité sur l'orbite, ni des nombreuses irrégularités du mouvement d'ensemble, mais de la rotation, qui transforme la trajectoire de chaque point en une spirale à 365 spires, et que l'expérience de Foucault a rendue visible. Eh bien, dans l'expérience de Michelson, on considère le mouvement comme uniforme, et on en a pleinement le droit; quelles sont, en effet, ses variations, pendant le temps que la lumière met à parcourir quelques mètres dans un laboratoire?

De même, le *champ de gravitation* de la Terre, c'est-à-dire le canton de l'espace où se fait sentir la gravitation vers la Terre, est assez étendu; et ce champ ne manque pas de puissance : il suffit à maintenir la Lune sur son orbite. Nous verrons pourtant, au paragraphe suivant, qu'il est négligeable à l'égard des phénomènes lumineux, sur lesquels des champs plus puissants se font sentir.

En résumé, si l'on s'en tient à la lettre des définitions, il n'existe pas d'espaces galiléens, donc pas de corps parfaitement libres, donc pas de mouvement uniforme; et le principe de Galilée ne trouve aucune application. Mais en pratique, et selon le problème considéré, le contraire est admissible; un mouvement suffisamment court peut être considéré comme uniforme; un mouvement varié quelconque peut être considéré comme une suite de mouvements élémentaires uniformes.

Mais finalement, si l'on peut admettre ainsi l'existence du mouvement uniforme, ce n'est qu'à titre d'exception, de limite; la règle, le droit commun, dans la nature, c'est le mouvement varié. Dans ces conditions, le principe de relativité, tel qu'Einstein l'a posé en 1905, participe de la précarité du principe de Galilée, puisqu'il n'en est que le développement (par incorporation de la loi de Michelson). Il était donc naturel de se demander comment il faut formuler les lois naturelles pour qu'elles soient également acceptables pour deux observateurs qui sont, l'un par rapport à l'autre, en état de mouvement varié; et tel est le problème de la relativité généralisée.

27. — L'incurvation des rayons lumineux.

Une autre considération ne tarda pas à montrer la nécessité d'élargir le principe de relativité de 1905.

On a vu que toute radiation a une masse. C'est dire qu'elle est soumise à la gravitation, qu'elle a un poids.

Les poètes, ici, se voileront la face : prétendre peser un rayon de lumière, quel scandale! et pourtant, cela est : la lumière presse, la lumière pèse.

Mais alors, on tombe sur une contradiction. La lumière, en passant suffisamment près d'une masse, c'est-à-dire en traversant un champ de gravitation, est déviée vers cette masse, comme pour y tomber : elle prend une « accélération normale ». Or, la théorie de la relativité est fondée sur la loi de Michelson, qui pose que la lumière se propage, en tous sens, en ligne droite, avec une vitesse invariable; si elle aboutit à établir le contraire, il semble qu'on verse en pleine absurdité.

Dans un mémoire intitulé : *De l'influence de la gravitation sur la propagation de la lumière*, Einstein a résolu cette difficulté en 1911.

La loi de Michelson est valable pour les espaces galiléens ; elle concerne la vitesse de la lumière dans le vide, et à l'abri de toute influence gravitative sensible.

Or, vis-à-vis de la lumière, dont la masse est si faible et la vitesse si grande, l'atmosphère terrestre peut être considérée comme un milieu galiléen. Son indice de réfraction est voisin de l'unité, le mouvement relatif peut être considéré comme uniforme (voir le paragraphe précédent), enfin la masse de la Terre n'est pas suffisante pour influencer sensiblement une radiation aussi rapide.

Il n'en est pas de même lorsque la lumière vient à passer dans la sphère d'action d'une masse beaucoup plus grande. Le Soleil, par exemple, a une masse 324 000 fois supérieure à celle de la Terre ; et un rayon lumineux passant assez près de lui, se trouve dévié comme s'il tendait à y tomber. Dans ce premier travail, Einstein évalua la déviation à 83 centièmes de seconde d'arc ; plus tard, il la doubla, et la porta à 175 centièmes. Certes, c'est bien peu de chose : 175 centièmes de seconde sont l'angle sous lequel on voit un dixième de millimètre, c'est-à-dire un cheveu très fin, à 12 mètres de distance, ou encore l'angle sous lequel on verrait un homme à 210 kilomètres (distance de Paris à Roubaix). Mais, à la distance du Soleil (149 millions de kilomètres), cet angle minuscule correspond à un écart de 1 261 kilomètres ; c'est-à-dire qu'un rayon qui, cheminant dans le vide, aboutit à Paris, tomberait à Budapest si le Soleil venait se placer près de sa route ; c'est là un coude appréciable, sur une trajectoire que l'on a coutume de donner comme exemple de la ligne droite parfaite.

Soient donc E une étoile, et T la Terre (*fig.* 9). Si leur intervalle est un espace galiléen, nous verrons l'étoile dans la direction TE (je néglige ici le phénomène de l'aberration, indiqué aux paragraphes 11 et 16 ; ou, si l'on préfère, j'admets que TE est sa « direction fictive »). Mais si la Terre est venue se placer de telle sorte que cette droite passe suffisamment près du Soleil, le rayon sera dévié et courbé suivant *ab ;* puis, une fois sorti du champ de gravitation solaire, il reprendra un parcours rectiligne *bc*. Le rayon qui nous parviendra aura suivi un parcours analogue E*de*T ; de sorte que l'étoile nous apparaîtra suivant la direction T*ee'*, plus éloignée du Soleil que la direction TE suivant laquelle nous la verrions sans l'intervention de ce dernier.

En annonçant ce résultat, Einstein conviait les astronomes à le vérifier quand les circonstances le permettraient ; et l'on verra plus loin que cette vérification fut faite, avec un plein succès, au bout de huit ans.

Quoi qu'il en soit, c'est-à-dire sans qu'il fût besoin d'attendre cette confirmation expérimentale, l'accroissement possible de la vitesse de la lumière, dans de certaines conditions, montre, non pas que la théorie particulière était fausse, comme d'aucuns se sont hâtés de le dire, mais qu'elle n'était, elle-même, qu'une deuxième approximation (la première étant fournie par la théorie de Galilée et Newton). Il était nécessaire de serrer la question de plus près encore.

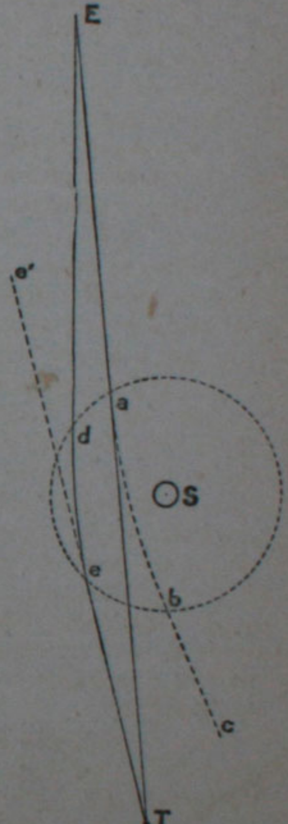


Figure 9.

28. — Les formules de transformation.

Dès 1902, Poincaré avait senti l'insuffisance du principe classique de Galilée, et la nécessité d'arriver à établir un principe de relativité valable pour des observateurs à l'état de mouvement varié. Ernest Mach avait exprimé la même idée en 1907, après l'établissement du principe particulier par Einstein. Mais ni l'un ni l'autre n'était allé plus loin que cette simple indication d'un but à atteindre.

C'est qu'il ne suffisait pas de formuler le principe général, c'est-à-dire d'énoncer :

Les lois physiques sont les mêmes pour des observateurs qui se trouvent, les uns par rapport aux autres, dans des états quelconques de mouvement,

Ou, ce qui revient au même :

Les phénomènes physiques peuvent être rapportés indifféremment à tout système de référence animé d'un mouvement quelconque.

Il fallait encore trouver — et là était la difficulté — comment un phénomène, rapporté d'abord à l'un de ces systèmes, est exprimé lorsqu'on vient à le rapporter à un autre. Ce problème est celui qui consiste à trouver les *équations de transformation* qui permettent de passer d'un système à l'autre; et voici ce qu'il faut entendre par là.

Restons d'abord dans l'hypothèse de Galilée, qui pose que, dans dans un système en translation uniforme, les choses se passent comme si le système était au repos. Considérons un train qui défile devant nous pendant une minute, en ligne droite et en palier, à la vitesse de 108 kilomètres à l'heure (30 mètres par seconde), à partir du kilomètre 10 de la voie, que nous prenons pour origine des coordonnées; et admettons que, dans le train, on ait pris pour origine l'arrière du wagon de queue. Enfin, prenons pour origine du temps l'instant où cet arrière passe à hauteur du kilomètre 10; ce sera, par exemple, à midi.

A cet instant, deux voyageurs, qui sont à 150 mètres de l'arrière (c'est-à-dire dont la coordonnée de longueur, l'x, est égale à 150 dans le train, et à 10150 par rapport à la voie), se mettent en marche dans le couloir, l'un vers l'avant et l'autre vers l'arrière, au pas ordinaire de 1 m, 50 par seconde. Quelle sera la situation générale au bout d'une minute?

Dans le train, chaque voyageur aura parcouru 90 mètres. Ils seront donc, le premier à 240 mètres, et le second à 60 mètres de l'arrière; autrement dit, leurs x respectifs, mesurés dans le système train, seront 240 et 60.

Pour nous, qui sommes à terre, chaque point du train aura progressé de 1800 mètres ; l'arrière sera donc au point 11800 de la voie ; et le point de départ des deux voyageurs aura passé du point 10150 au point 11950. Quant à nos deux hommes, ils auront, en vertu du principe de Galilée, parcouru le même chemin par rapport au sol que dans le couloir en mouvement ; leurs x respectifs seront donc :

$$11950 + 90 \text{ et } 11950 - 90, \text{ soit } 12040 \text{ et } 11860.$$

D'autre part, ils ne se sont écartés de la ligne droite ni en largeur ni en hauteur : leurs coordonnées y et z n'ont pas varié.

Enfin, leurs montres, supposées parfaites et d'accord avec la nôtre au début de l'expérience, marquent également midi plus une minute : avant Lorentz, la question de la variabilité du temps ne se posait même pas.

Telle est la *transformation galiléenne ;* les enfants de l'école primaire la pratiquent d'instinct, sans en connaître le nom.

***

Vint ensuite le principe particulier d'Einstein, consistant à concilier le principe de Galilée avec la loi de Michelson. Nous savons qu'il conduit à évaluer différemment les longueurs et les durées dans deux systèmes à l'état de translation relative uniforme ; et voici dès lors comment les choses se passent.

Prenons d'abord le point de vue du système mobile. Supposons que le serre-frein du wagon de queue déclare qu'il était midi plus une minute à l'instant où il a franchi la borne 11800. A bord du train, tout se sera passé comme plus haut : pendant cette minute, les deux voyageurs auront marché à la vitesse de 1 m,50 par seconde, et ils auront atteint les points cotés 240 et 60. Mais voici ce que nous répondrons au serre-frein :

« Votre montre retarde. Il était plus de midi et une minute quand vous avez passé au point 11800. Les deux voyageurs ont donc marché plus d'une minute ; d'autre part, leurs trajets, que nous avons mesurés, étaient inférieurs à 90 mètres; double raison pour que leur vitesse n'ait pas atteint 1 m, 50 par seconde. De tout cela il résulte qu'à l'instant considéré, il ne se trouvaient pas, respectivement, aux points 12040 et 11860. »

Mais où étaient-ils, de notre point de vue, et à combien s'élève le désaccord des montres? Pour le calculer, on est obligé de remplacer la transformation galiléenne par les relations qu'Einstein a établies rationnellement, et auxquelles, se plaisant à rendre hommage à l'intuition de Lorentz, il a donné le nom de *transformation lorentzienne*.

Il n'y a pas lieu de reproduire ici ces équations, qui ne feraient que donner à notre texte un aspect inutilement rébarbatif. Je me bornerai à dire qu'Einstein en a donné d'abord une démonstration dont la lecture demande des connaissances mathématiques assez avancées, puis une autre, qui est à la portée des débutants.

***

Si enfin nous passons à la relativité généralisée, c'est-à-dire que nous voulions rapporter un mouvement à des repères qui sont, par rapport à son système, en mouvement varié, nous rencontrons des difficultés devant lesquelles les procédés courants de l'analyse supérieure sont eux-mêmes en défaut.

Pour établir les formules de transformation applicables à ce cas, il faut employer les moyens d'action les plus récents et les plus abstrus de l'analyse, le calcul différentiel absolu ou calcul des tenseurs, que peu de mathématiciens sont en état de manier.

Saluons au passage les noms, naturellement inconnus du grand public — de leurs créateurs, Gauss, Riemann, Christoffel, Ricci, Levi-Cività; et constatons qu'il est heureux que le physicien Einstein se trouve être un virtuose des puissants instruments de travail qu'ils ont imaginés. Mais contentons-nous modestement d'accepter les conclusions qu'il en a tirées, et que de plus habiles que nous ont pu vérifier...

29. — Gravitation et mouvement accéléré.

Pour saisir ce qui fut à la fois la cause de ces difficultés et la clef de leur solution, il faut se reporter à l'identité qui existe entre un mouvement varié, de cause quelconque, et l'effet de la gravitation.

Tout mouvement comporte deux éléments distincts et susceptibles de variation, la direction et la vitesse.

Dans le cas où la vitesse seule varie, c'est-à-dire où l'on a affaire à une translation accélérée, Einstein montre par l'exemple suivant l'équivalence de ce mouvement et d'un effet de gravitation.

Supposons-nous à l'intérieur d'une cabine isolée, à distance pratiquement infinie de toute autre masse; et négligeons les masses de la cabine et de nos instruments, qui sont faibles. Bref, considérons notre espace comme galiléen. Nous ne connaîtrons alors ni pesanteur ni verticale. Tout objet restera où on l'abandonnera doucement. Nous pourrons nous maintenir, en l'air, dans une orientation quelconque; mais le moindre choc nous enverra, d'un mouvement uniforme, à l'autre bout du local. Enfin, si la cabine est animée d'un mouvement uniforme, nous ne nous en apercevrons pas.

Mais supposons que soudain tous les objets contenus dans la cabine (nous compris) prennent une même vitesse accélérée dans une même direction, c'est-à-dire « tombent » vers une paroi qui méritera dès lors le nom de « plancher », et qu'une fois arrvés à ce plancher, nous nous y sentions maintenus par une pression constante, dont le siège semblera être en nous-mêmes.

Nous aurons alors le choix entre deux hypothèses : ou bien la cabine subit l'action gravitative d'une masse située au delà du plancher, ou bien elle est emportée en sens opposé par un mouvement accéléré. Si, par un hublot, nous apercevons un câble partant de la paroi opposée au plancher (le « plafond »), et tendu dans la direction de la chute des corps (la « verticale ») rien ne nous permettra de discerner si la cabine est suspendue, au repos, « au-dessus » d'un corps céleste, ou si elle est toujours dans un espace galiléen, et qu'on la hisse avec une vitesse accélérée.

Ici, on voudra bien me permettre deux remarques.

D'abord, ce qui précède allait de soi ; si bien, qu'il était superflu de l'exposer. La première loi qu'on enseigne aux débutants en physique est en effet celle de la chute des corps, qui coïncide précisément avec celle qui sert de définition au mouvement uniformément accéléré. Or, nous ne faisons pas ici de métaphysique, nous ne nous occupons que des effets mesurables ; et du moment que, par ces effets, nous constatons qu'un mouvement est uniformément accéléré, nous sommes libres de remplacer dans le raisonnement sa cause, qui peut être la pesanteur, par toute autre ayant la même action ; et la seule existence d'un tel mouvement ne nous permet donc pas de dire laquelle, de toutes ces causes possibles, est en jeu.

En second lieu, il faut noter — comme par une vieille habitude — que ce qui vient d'être dit de la pesanteur n'est vrai que dans de certaines limites. Si cette force était réellement constante, elle devrait, en agissant indéfiniment, pouvoir amener un corps à une vitesse indéfiniment croissante.

Mais on sait qu'elle agit inversement au carré de la distance, et qu'elle devient donc rapidement insensible : si l'on applique la loi de Newton, on trouve qu'un corps, tombant de l'infini, arriverait à la surface de la Terre avec une vitesse ne dépassant pas 11 000 mètres par seconde. Bien entendu, sur une masse plus importante, la vitesse d'arrivée serait plus grande. Mais en résumé, la vitesse de chute ne peut être dite uniformément accélérée que sur une distance de chute assez faible pour que l'intensité de la pesanteur n'y varie pas sensiblement. Autrement dit, la loi classique de la chute des corps n'est valable qu'en première approximation, pour les chutes de peu de hauteur. Cette remarque est importante, et l'on peut s'étonner qu'elle soit passée sous silence par les auteurs qui posent, avec Einstein, l'équivalence de la gravitation et du mouvement uniformément varié.

* * *

Si maintenant nous passons au mouvement varié en direction, c'est-à-dire à la rotation, la question se présente beaucoup moins simplement.

La rotation détermine une accélération centrifuge, dont un effet, au moins, est banal : de même que, dans une voiture qui subit un à-coup dans le sens de son mouvement (*accélération longitudinale*, ou *tangentielle*), on se sent poussé vers l'avant ou l'arrière, chacun sait que, si ce véhicule prend un tournant sans changer de vitesse, on est entraîné perpendiculairement au sens de la marche, vers l'extérieur du tournant (*accélération transversale*, ou *centrifuge*). C'est cette action qui détermine l'aplatissement d'un corps sphérique en état de rotation : les molécules tendent à s'éloigner de l'axe d'autant plus que leur vitesse est plus grande, c'est-à-dire qu'elles sont plus voisines de l'équateur.

Newton concluait de là que l'état de rotation se manifeste à l'intérieur d'un système, indépendamment de toute référence à un système extérieur, c'est-à-dire que la rotation est un état de mouvement absolu, en quoi elle différerait essentiellement de la translation. Il se trompait, ainsi qu'on l'a montré bien des fois. Mais cette discussion nous entraînerait trop loin, et il suffira d'en indiquer ici un argument topique.

Considérons, avec Einstein, un observateur placé sur un disque plan, sans aucune vue sur le monde extérieur.

Si le disque se met à tourner autour de son centre, notre homme se sentira entraîné vers la périphérie ; mais rien ne lui permettra de discerner s'il participe à un mouvement de rotation, ou s'il gravite vers une masse située au bout du rayon sur lequel il se trouve.

Il sera dans la même indécision que s'il faisait l'expérience de la cabine dont il a été question plus haut. En somme, la rotation a simplement déterminé pour lui une accélération centrifuge ; or, une accélération est, par définition, une variation de la vitesse ; elle est donc relative, comme toute vitesse, comme toute translation.

Cet exemple du disque tournant est d'ailleurs du plus grand intérêt par les conclusions tout à fait troublantes auxquelles il conduit.

Considérons un grand plateau fixe, représentant un système galiléen, et percé d'une ouverture circulaire. Dans cette ouverture s'ajuste exactement un disque plat, tournant autour de son centre. Je me place sur le disque, vous restez sur le plateau, et nous allons résoudre, chacun de notre côté, un problème de géométrie élémentaire ; par exemple, nous mesurerons le rapport de la circonférence du disque à son diamètre.

Afin que nos mesures soient comparables, je diviserai la circonférence en très petits éléments, que nous pourrons considérer comme sensiblement rectilignes, et que vous mesurerez à mesure qu'ils défileront devant vous, de manière que vous les aperceviez successivement dans la même direction, c'est-à-dire réduits dans la même proportion par leur mouvement relatif.

Naturellement, vous compterez le même nombre d'éléments que moi. Mais vous leur attribuerez une longueur moindre ; vous déclarerez la circonférence moins longue que je ne ferai.

Quant au diamètre, si je le mesure en portant constamment ma règle dans votre direction, c'est-à-dire perpendiculairement au mouvement, nous lui attribuerons même longueur. Dans les deux cas, bien entendu, ma règle est solidaire de mon sol tournant, et je trouverai donc bien, en opérant la division, le quotient classique, 3,1416. Mais si vous contrôlez mon opération sur les mesures que vous avez prises, vous diviserez une circonférence plus courte par un même diamètre, et vous estimerez donc que, chez moi, leur rapport a une certaine valeur, inférieure à 3,1416.

Et encore, il ne suffit pas de dire « une certaine valeur ». Car si j'opère, non à la périphérie du disque, mais sur un cercle concentrique intérieur, la vitesse tangentielle y sera moindre ; les longueurs vous y apparaîtront donc moins réduites, et vous trouverez donc un rapport moins différent de la valeur classique. Vous arriverez à cette conclusion que, sur un disque tournant, la valeur de ce rapport varie selon la situation du cercle : la géométrie y diffère d'un endroit à l'autre !

De même pour le temps. A la périphérie du disque, ma montre vous paraît retarder sur la vôtre ; et si je me dirige vers le centre, ce retard ira en décroissant, jusqu'à s'annuler au centre même, où la vitesse tangentielle est nulle.

Et même, les figures que j'aurai tracées ne vous paraîtront pas fixes, mais animées d'une pulsation qui les déformera continuellement. Pour s'en convaincre, il suffit de considérer deux points voisins sur une même circonférence concentrique au disque ; suivant qu'ils passent devant vous, dans la direction perpendiculaire à votre regard, ou qu'ils sont alignés suivant ce regard, leur intervalle vous semblera contracté au maximum, ou pas du tout.

Nous arrêterons là ces observations, qu'on peut multiplier à volonté. Elles se résument en ceci, que les figures géométriques tracées sur un disque tournant apparaissent, à un observateur au repos, non seulement différentes de celles qu'il aurait construites par les mêmes procédés, mais mobiles, à l'état de déformation continuelle.

Or, ces faits tiennent à l'existence d'accélérations qui diffèrent de lieu en lieu ; et, d'autre part, de semblables accélérations ne se distinguent pas des effets produits par la gravitation. D'où il suit que l'existence de masses (c'est-à-dire de champs de gravitation), à l'intérieur d'un espace galiléen, y détermine des phénomènes de cette nature. Si nous sommes dans un milieu galiléen (ou dans un milieu qui puisse être considéré comme sensiblement galiléen), les figures géométriques que nous tracerons seront comparables entre elles. Si nous sommes, l'un dans un tel milieu, et l'autre dans un champ de gravitation, les figures que nous construirons par des procédés identiques nous paraîtront différentes ; et en outre, si ces deux milieux sont à l'état de mouvement relatif, elles seront toujours rigides pour leur auteur, mais l'autre les verra palpiter et se déformer sans cesse.

30. — Résolution du problème.

On se rend compte maintenant de la complication du problème de la relativité généralisée.

L'Univers, en effet, se présente à nous comme un espace vide de ce que nous appelons la matière, parsemé, de loin en loin, de petites masses qui sont les corps célestes, et traversé en tous sens par des radiations, qui sont des masses extraordinairement faibles et rapides.

En langage einsteinien, ce fait se traduit en ces termes, que l'Univers est un espace galiléen parsemé de champs de gravitation de puissances très diverses.

Ces champs de gravitation sont des régions dans lesquelles agissent des forces centrales, imprimant des accélérations à tous les mobiles qui viennent à passer par là.

Nous savions déjà que la vitesse uniforme, possédée par un mobile dans une région galiléenne, modifie, aux yeux d'un observateur non solidaire du mouvement, les longueurs et par conséquent la forme de ce mobile, ainsi que l'écoulement du temps. Mais encore une droite y reste une droite ; la nouvelle forme se maintient tant que la vitesse ne change pas ; et le temps continue à s'écouler uniformément.

Mais dans un champ de gravitation, la vitesse ne cesse de varier, et par conséquent il ne s'agit plus de déformations et de retards acquis une fois pour toutes, mais ces variations ne cessent de se modifier elles-mêmes. Bien mieux, un mobile, quel qu'il soit, n'est jamais soumis à l'action d'un seul champ de gravitation : il subit toujours plusieurs de ces actions, qui se composent à chaque instant de la manière la plus capricieuse. Il résulte de là que les trois plans de référence, tout en restant invariables aux yeux d'un observateur situé dans leur système, apparaissent à l'observateur extérieur comme des surfaces, son seulement gondolées et bosselées, mais continuellement mobiles, comme des chiffons qui flottent au vent. Leurs lignes d'intersection (les trois *axes de coordonnées* de Descartes) ne sont plus, pour cet observateur, un système rigide pouvant tout au plus prendre un mouvement d'ensemble, mais des filaments se tordant en tous sens. C'est ce qu'Einstein exprime d'une façon pittoresque en disant que nous n'avons plus devant nous des axes, mais une *pieuvre de référence*.

Ainsi deux observateurs, à l'état de mouvement relatif varié, continuent bien à posséder, dans leurs systèmes respectifs, des repères fixes, auxquels ils peuvent apporter leurs observations. Mais si l'un d'eux veut apporter à ses repères des mesures qui ont été prises par rapport aux autres, ceux-ci lui paraissent tels que les tentacules de la pieuvre, et ne peuvent lui fournir aucune indication utile ; l'instrument forgé par Descartes est en défaut.

Einstein a sauvé la situation en appliquant à ce cas une géométrie analytique supérieure, fondée sur l'emploi des « coordonnées intrinsèques » de Gauss, qui eussent elles-mêmes été insuffisantes si elles n'avaient été généralisées par Riemann. Il arrive ainsi à représenter la situation et le mouvement d'un point par des équations d'une belle symétrie sous leur apparente complication, et qui possèdent cette qualité, que le lecteur avisé aura devinée avant de la voir imprimée : elles s'appliquent aux régions où il existe des champs de gravitation, et, lorsqu'on passe de là dans une région galiléenne, ou pratiquement telle (c'est-à-dire où l'action de la gravitation est négligeable), elles se réduisent d'elles-mêmes aux équations de la relativité particulière, en même temps que les coordonnées de Gauss se ramènent à celles de Descartes. Ce n'est point ici le lieu de développer davantage ces conceptions ardues. Nous nous bornerons à indiquer qu'elles ont conduit leur auteur à une loi de la gravitation plus compliquée que celle de Newton, et qui, bien loin de la détruire, comme on a eu l'imprudence de l'écrire, la développe et la contient à l'état de cas-limite.

***

En résumé, l'étude du mouvement relatif s'est faite en trois étapes, ou, si l'on préfère, s'est élevée successivement à trois niveaux différents.

On a commencé, naturellement, par s'occuper du cas le plus simple, celui du mouvement uniforme, dont les propriétés sont exprimées par le principe de Galilée, ou principe classique de relativité.

Mais quand la vitesse atteint l'ordre de grandeur de la vitesse de la lumière, la transformation si simple fournie par ce principe est en défaut ; on est obligé de recourir à la théorie de la relativité particulière, posée par Einstein en 1905. Cette théorie contient d'ailleurs la précédente, qui en est le cas-limite, correspondant aux cas où la vitesse relative est négligeable devant celle de la lumière, et qui reste donc valable pour toutes nos applications mécaniques.

Enfin, le mouvement uniforme lui-même n'est qu'une abstraction ; c'est le cas-limite vers lequel tend le mouvement varié, seul existant réellement dans la nature, lorsque les variations deviennent assez faibles pour pouvoir être négligées. Si l'on est obligé de tenir compte de ces variations, il faut appliquer la théorie de la relativité généralisée, qu'Einstein a édifiée de 1911 à 1916.

CHAPITRE IV

LES CONFIRMATIONS EXPÉRIMENTALES

31. — La rotation de l'orbite de Mercure.

S'il n'existait qu'une seule planète, elle décrirait, autour du Soleil, une ellipse de position invariable (loi de Képler).

Mais il en existe plusieurs, dont chacune perturbe le mouvement des autres. Un des résultats de cette action réciproque est que chaque orbite tourne lentement autour de son axe ; et, à l'observation, ce mouvement concorde avec les prévisions fondées sur la loi newtonienne de la gravitation, sauf pour Mercure, planète la plus voisine du Soleil et la plus rapide (sa vitesse est de 100 kilomètres par seconde, contre 30 pour la Terre).

C'est en 1845 que Leverrier constata, pour cette planète, un excès de déplacement, se montant à un arc de 43 secondes par siècle.

D'après des observations de Newcomb, récemment calculées par Grossmann, ce nombre se réduirait à 38 secondes.

On imagine difficilement la petitesse de ces écarts. Ils ne représentent, en effet, que la 30000^e ou la 34000^e partie de la circonférence ; de sorte qu'il faut 30000 ou 34000 siècles, soit quelque trois millions d'années, pour que, de ce chef, l'orbite fasse un tour supplémentaire sur elle-même. Mais aucun écart n'est insignifiant pour les astronomes, lorsqu'il se multiplie par l'énormité de la distance ou de la durée ; et celui-ci fit leur désespoir pendant plus de soixante ans : on épuisa les hypothèses, souvent tout à fait gratuites, pour l'expliquer.

Vint enfin la théorie einsteinienne de la gravitation. Nous savons qu'en première approximation, elle se confond avec celle de Newton, qui suffit pour les autres planètes, au moins pour un nombre de siècles dont nous n'avons pas idée. Mais dans le cas de Mercure, plus rapide et courant sur une orbite plus excentrique, il faut pousser l'approximation plus loin ; et la formule d'Einstein donne, comme l'observation de Leverrier, 43 secondes d'écart par rapport à celle de Newton.

Lors même que l'écart réel ne serait que de 38 secondes, l'excès de 5 secondes par siècle, fourni par la formule d'Einstein, serait bien inférieur aux incertitudes de l'observation sur des quantités aussi minimes; et l'on resterait en droit de dire que ce résultat est aussi remarquable que le calcul de Leverrier déterminant le point du ciel où Galle devait chercher et découvrir Neptune.

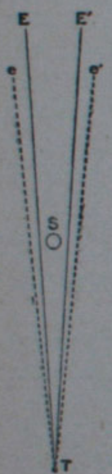


Figure 10.

32. — L'incurvation des rayons lumineux.

On a vu, au paragraphe 27, qu'Einstein annonça en 1911, qu'un rayon lumineux, passant au voisinage du Soleil, devait être dévié par l'action gravitative; et que, plus tard, cette déviation fut fixée par lui à 175 centièmes de seconde; il conviait en outre les astronomes à vérifier ce fait à l'occasion de la prochaine éclipse totale de Soleil.

Considérons, en effet, suivant les directions TE et TE' (*fig.* 10), deux étoiles dont l'intervalle nous apparaisse à peine plus grand que le diamètre apparent du Soleil, c'est-à-dire, en langage d'astronome, deux étoiles dont la distance angulaire dépasse très peu ce diamètre apparent. Si, dans son mouvement apparent, le Soleil S vient s'interposer entre la Terre et elles, les rayons émanés d'elles, et aboutissant à notre œil, raseront le Soleil et seront déviés par lui, chacun de 1,75 seconde, suivant les directions T*e* et T*e'*; la distance angulaire des deux étoiles nous semblera donc accrue de 3,5 secondes par rapport à sa valeur normale.

Seulement, on ne voit pas les étoiles en plein jour : pour que cette observation soit possible, il faut non seulement attendre une éclipse totale de Soleil, mais encore déterminer à l'avance, afin d'y envoyer des observateurs, des lieux situés de telle sorte qu'au moment de l'éclipse le Soleil y apparaisse justement entre deux étoiles assez importantes pour devenir visibles, et dont la distance angulaire soit de la grandeur voulue. Ces conditions ne sont pas souvent réalisées.

Elles devaient l'être en 1914, et une mission allemande fut envoyée au Caucase pour en profiter ; mais la guerre survint, et l'expédition fut internée avant d'avoir pu accomplir sa tâche.

Enfin, à l'occasion de l'éclipse du 29 mai 1919, la Société Royale de Londres envoya deux missions, l'une, dirigée par Eddington, à l'île des Princes, sur la côte de Guinée, et l'autre, sous la conduite de Crommelin, à Sobral, au Brésil.

La première, peu favorisée par le temps, n'obtint que deux bons clichés, sur seize, donnant une déviation de 1″,6. L'autre obtint sept bons clichés, donnant une déviation moyenne de 1″,98. La moyenne générale fournit donc une déviation 1″,895, soit un écart de 0″,145, par rapport à l'évaluation d'Einstein.

Ainsi, l'inertie des radiations lumineuses, annoncée par la théorie de la relativité, était nettement mise en évidence. Cette confirmation de la théorie eut un grand retentissement ; et l'on peut dire que la date du 29 mai 1919 est mémorable dans l'histoire de la science.

33. — L'effet Doppler-Fizeau et l'effet Einstein.

On a attaché les noms de Doppler et de Fizeau à un phénomène optique qui fut étudié par le premier de ces physiciens et appliqué par le second à la mesure de la vitesse d'un astre par rapport à la Terre.

Ce phénomène est assez délicat à exposer ; mais il est analogue à un effet acoustique bien connu, qui va nous aider à le faire comprendre. Un son continu, comme le sifflet d'une locomotive, nous semble plus aigu ou plus grave, selon que sa source se rapproche ou s'éloigne de nous. En outre, il varie avec la vitesse relative : quand un train entre en gare en sifflant, un observateur immobile entend le son baisser à mesure que la vitesse décroît.

Ce que notre oreille perçoit, en effet, ce sont des vibrations, dont le nombre définit la hauteur du son. Si la source émet 870 vibrations simples (ou 435 ondes sonores) par seconde, et que nous soyons au repos par rapport à elle, nous recevons pendant chaque seconde 435 ondes, et nous entendons un *la*. Si nous allons au-devant de ces ondes, ou que leur source vienne vers nous, les rencontres sont plus fréquentes, et nous entendons un son plus aigu ; inversement, le son nous paraît plus grave quand la source s'éloigne de nous. Si, enfin, la source vient à nous en ralentissant, les rencontres, plus fréquentes qu'au repos, vont en s'espaçant ; le son baisse jusqu'à l'arrêt, où nous entendons le son tel qu'il est émis.

Or, la lumière est un phénomène comparable au son. Elle est caractérisée par l'existence d'un rythme, dont la fréquence détermine pour notre œil une couleur ; et le spectre visible est compris entre le rouge, correspondant à 484 trillions de vibrations par seconde, et le violet, défini par 709 trillions.

De là, si la source lumineuse et l'observateur sont en mouvement relatif, l'effet Doppler : s'ils se rapprochent, on perçoit plus de vibrations, et la couleur tire sur le violet ; s'ils s'écartent, elle tend à rougir. Mais cet effet est absolument insensible à l'œil. On ne peut l'observer que par un déplacement des raies du spectre ; et encore faut-il disposer, pour cela, des appareils les plus puissants : à la vitesse relative de la Terre et du Soleil, le déplacement est inférieur à 6 cent-millionièmes de millimètre. Si peu que ce soit, cela a suffi à Fizeau pour évaluer la vitesse de certains astres et pour établir la dualité d'étoiles que le télescope est impuissant à dédoubler.

Or, nous savons (§ 29) que l'action de la gravitation est la même que celle d'un mouvement accéléré et, d'autre part, la masse du Soleil, 324 000 fois supérieure à celle de la Terre, n'est pas, comme celle-ci, sans effet sur les rayons lumineux : elle agit sur un rayon émis par le Soleil à la manière d'un mouvement relatif supplémentaire qui existerait entre le Soleil et nous, elle tend donc à ralentir les vibrations, à déplacer les raies du spectre vers le rouge. C'est ainsi qu'Einstein a expliqué certaines déviations qui avaient été constatées en 1897 par Jewell et en 1909 par Fabry et Buisson ; aussi nomme-t-on ce phénomène l'*effet Einstein*.

En résumé, d'une part, l'effet Doppler-Fizeau déplace les raies vers le violet ou vers le rouge, selon que nous nous rapprochons ou que nous nous éloignons du Soleil ; et d'autre part, l'effet Einstein, dépendant uniquement de la masse du Soleil, se superpose au précédent en le contrariant ou l'accentuant, puisqu'il détermine toujours un déplacement vers le rouge.

Il est très important, en effet, de remarquer que l'on ne saurait faire application ici de ce qui a été dit au paragraphe 23 sur la réalité des déformations. Les déformations lorentziennes, ainsi que l'effet Doppler-Fizeau, sont relatifs à l'état de mouvement, mais non l'effet Einstein.

Supposons que nous soyons également immobiles par rapport au Soleil et à une autre étoile de masse plus considérable, telle qu'Antarès. Nous y observerons, par comparaison avec les mêmes mesures prises sur Terre, une certaine contraction des longueurs et un certain ralentissement des durées, ce dernier se manifestant, notamment, par un décalage des raies du spectre vers le rouge ; et ces effets seront plus intenses sur Antarès que sur le Soleil.

Supposons ensuite que je reste en place, tandis que vous vous mettez en route. Ces effets subsisteront inchangés. Mais il s'en produira, pour vous, deux nouveaux : celui de Doppler-Fizeau, qui renforcera ou contrariera le ralentissement des vibrations, selon le sens de votre mouvement, et celui de Lorentz, qui s'ajoutera dans tous les cas à l'effet Einstein.

En résumé, il faut distinguer avec soin les trois phénomènes, superposés dans la réalité, et que j'énumère ici dans l'ordre où ils ont été découverts :

L'effet expliqué par Doppler tient au mouvement relatif de l'observateur et du lieu du phénomène ;

De même pour celui que Fitz-Gerald et Lorentz ont supposé, et qu'Einstein a démontré ;

Quant au troisième, annoncé par Einstein et encore imparfaitement vérifié, il ne dépend que de l'intensité du champ de gravitation dans lequel le phénomène se produit.

Pour exprimer cette différence, je dirai que les deux premiers sont des effets de *relativité de mouvement*, et le dernier, un effet de *relativité de gravitation*.

Malheureusement, il s'agit ici d'un phénomène extraordinairement difficile à mesurer : la déviation annoncée par Einstein n'est que d'un millième de millimicron, soit un milliardième de millimètre. Mais des observations faites en 1819 par Græbe et Bachem, et en 1921 par Pérot, tendent à confirmer l'existence et le sens de la déviation. On verra au paragraphe 38 comment il est permis d'espérer une confirmation plus nette.

***

Il faut encore signaler ici une difficulté qui se présente quand on essaye de donner, en langage courant, une explication de la contraction des longueurs qui résulte du mouvement relatif : on tend souvent à raisonner comme on ferait pour exposer l'effet Doppler-Fizeau, qui est tout autre chose. Je me suis longtemps heurté à cette difficulté, avant d'imaginer l'explication donnée au paragraphe 17 ; d'autres auteurs n'ont pas vu l'obstacle et ont commis cette confusion, qui mène à des résultats erronés (1).

---

(1) [L'effet Doppler-Fizeau se calcule au moyen d'une formule dans laquelle la vitesse relative entre à la première puissance. Il diffère donc, selon le sens de cette vitesse : la vibration paraît accélérée quand sa source et l'observateur vont à la rencontre l'un de l'autre, et ralentie quand leur distance va en croissant. Mais ce qui entre dans l'expression de la contraction lorentzienne, aussi bien que dans le calcul de l'effet Einstein, c'est le carré de la vitesse, de sorte que ces formules sont indépendantes du sens du mouvement relatif. Que deux mobiles se rapprochent ou s'éloignent l'un de l'autre, les longueurs y paraissent toujours contractées, jamais dilatées, comme les durées y paraissent toujours prolongées, de même que l'effet Einstein se manifeste toujours par un ralentissement des vibrations.]

CHAPITRE V

OBJECTIONS, CRITIQUES ET MISE AU POINT

34. — A l'Académie des sciences.

Parmi les nombreuses communications faites à l'Académie des sciences sur la relativité, celles que P. Painlevé a présentées les 24 octobre et 14 novembre 1921 ont eu un retentissement inaccoutumé.

A la vérité, le texte qu'on en trouve dans les *Comptes rendus* est d'une lecture difficile et, d'autre part, elles n'ont donné lieu à aucune discussion en séance, car même les savants qui les entendirent étaient peu préparés à y répondre, et un seul les fit suivre de quelques considérations d'ordre général et qui ne les touchaient pas directement. Mais des journaux s'emparèrent de l'incident, en y mêlant une pointe de nationalisme scientifique. Ils représentèrent Painlevé comme le tombeur d'une doctrine importée d'outre-Rhin, comme le vengeur de Newton attaqué par Einstein, — lequel a dû être fort étonné de se voir inculper de lèse-newtonisme ! Bref, une foule de gens, après avoir entendu dire qu'un certain Einstein a sapé, dynamité les fondements de la science, en sont maintenant à se demander si le vieil édifice n'a pas été miraculeusement relevé dans son état primitif, et finissent par se représenter le progrès scientifique comme un jeu de quilles, où l'on s'amuse à abattre des théories.

Voici les conclusions, moins extrêmes, que cette controverse me semble comporter :

En premier lieu, Painlevé s'oppose à la conception qui veut que tout mouvement soit relatif. Pour lui, il existe bien dans l'Univers un système de référence privilégié, selon la conception de Newton; et notons ici en passant qu'il serait plus exact de dire : « selon la conception de Galilée, admise par Newton ».

Il a tort, et il a raison, selon le point de vue où l'on se place.

S'il veut dire que ces axes privilégiés existent, dans le sens le plus strict du mot *exister*, il se place sur le terrain de l'invérifiable métaphysique, où nous ne pouvons le suivre. Pour définir de pareils axes, en prenant pour origine le centre de gravité du système solaire, il faudrait, en effet, que nous pussions déterminer trois points de l'Univers qui fussent rigoureusement immobiles par rapport à ce centre de gravité, c'est-à-dire qui eussent rigoureusement le même mouvement que lui par rapport à tous les autres points de l'Univers. Poser une pareille condition suffit à montrer la vanité de tout effort tendant à y satisfaire, au milieu du fourmillement incessant de toutes choses.

Mais, si l'on reste sur le seul terrain qui nous soit accessible, celui de l'observation et des mesures, et que l'on veuille dire simplement qu'en première approximation, les choses se passent comme s'il existait un système de référence absolument immobile, alors, tout le monde est si bien d'accord que cette proposition était inutile à énoncer.

Voici, par exemple, deux étoiles qu'on peut appeler « voisines » de nous : Alpha du Centaure, à 4 ans 1/2 de lumière, et la Polaire, à 46 ans 1/2, et une autre, dont la distance est encore « assez petite » : Antarès, à 370 ans de lumière. En admettant que le système solaire, dans son ensemble, parcoure 20 kilomètres par seconde dans une direction précisément perpendiculaire à celle de l'un ou l'autre de ces astres, il faudrait respectivement 120 jours, 40 mois, ou 27 ans, pour que l'on pût observer chez ces trois astres un déplacement d'une seconde d'arc. Si nous considérons une étoile située aux confins de la Voie Lactée, dont le demi-diamètre est évalué à 15000 ans de lumière, il faudrait 1100 ans de cette course pour mettre en évidence pareil déplacement d'une seconde. Quant aux nébuleuses extérieures à la Voie Lactée, qui sont à des distances auprès desquelles la précédente est insignifiante, il faudrait une durée inimaginable pour que leur situation apparente fût modifiée par la translation du système solaire.

En toute tranquilité nous pouvons donc raisonner et opérer, dans la plupart des applications, mêmes astronomiques, comme s'il existait un système privilégié, mais nous n'avons pas le droit de dire que ce système existe réellement.

***

La seconde objection de Painlevé est qu'on peut, tout en laissant le temps et l'espace indépendants l'un de l'autre, établir diverses formules de la gravitation, différentes de celles d'Einstein, mais se ramenant comme elle, en première approximation, à celle de Newton, et rendant compte du déplacement du périhélie de Mercure, ainsi que de la déviation des rayons lumineux par les grandes masses, comme celle du Soleil, sans entraîner certaines « conséquences philosophico-scientifiques qui ont été, suivant les jugements, le scandale ou le miracle de la théorie de la relativité ». Ces conséquences, qui en réalité n'en font qu'une, sont que : 1° les vibrations lumineuses d'un même atome sont plus courtes près du Soleil que sur la Terre, et 2° que nos solides dits invariables, nos mètres en particulier, doivent se raccourcir tous dans le même rapport dans la direction du Soleil, quand ils sont plus près de celui-ci.

Notons d'abord que la possibilité d'établir de pareilles formules n'est pas aussi surprenante que le profane peut être tenté de le croire. Pour des virtuoses du calcul, tels qu'Einstein et Painlevé, c'est un problème plus ou moins compliqué, mais toujours abordable, que de construire une fonction qui rende compte de certains phénomènes et, dans des circonstances déterminées, se ramène à une autre. Cela revient, en somme, à tracer une courbe passant par certains points, et dont un certain arc se confonde avec un arc donné; on conçoit aisément que ce problème admette plus d'une solution.

Voici, à l'appui de cette assertion, un souvenir personnel. La balistique extérieure, c'est-à-dire la science du mouvement d'un projectile après sa sortie de la bouche à feu, est comme l'astronomie une science mi-rationnelle et mi-expérimentale; on peut dire qu'elle est l'astronomie des satellites terrestres lancés par les artilleurs, ou que l'astronomie est la balistique des corps célestes. Or, à l'époque déjà lointaine où, comme officier de l'artillerie de terre, j'étais détaché à la Commission d'expériences de la Marine, nos deux départements militaires n'avaient pu s'entendre sur les formules de la résistance de l'air. Je ne sais s'ils y sont parvenus depuis lors; mais, à cette époque, il existait une balistique de la Guerre et une de la Marine, respectivement fondées sur les formules de Sarrau et d'Hélie.

En outre, consultons un ouvrage peu connu (car il n'a pas été mis dans le commerce), le manuel rédigé par la maison Krupp pour l'établissement des tables de tir de ses canons; les formules y sont toutes différentes et, sans aucun doute, on en trouverait bien d'autres dans les manuels officiels des autres pays.

Or, toutes ces balistiques sont équivalentes, une fois qu'on a déterminé par l'expérience les diverses constantes qui entrent dans leurs formules. Pour un projectile de forme et de poids donnés, lancé avec une vitesse initiale et sous un angle donnés, elles fournissent même portée, même flèche, même vitesse restante, même angle de chute, même dérivation, mêmes écarts probables. Bref, nous calculons la trajectoire comme nous pouvons; mais, ainsi que l'écrivait le général Chapel, alors capitaine, dans un poème où il célébrait la construction encore récente du canon de 90 :

...... et le brave boulet
Prenait sans hésiter le chemin qu'il fallait !

Ce qui montre la supériorité des projectiles sur les balisticiens...

Eh bien, pareillement, les astres massifs, aussi bien que les radiations les plus subtiles, prennent sans hésiter le chemin qui convient. Pendant ce temps, astronomes et physiciens peuvent établir toutes sortes de formules, se ramenant, dans des circonstances particulières, à celles de Newton où à d'autres; et toutes ces formules seront équivalentes si elles rendent également compte des phénomènes dans la mesure où nous pouvons les observer. Par quoi il faut entendre que, de deux formules traduisant également ces phénomènes, nous sommes libres de choisir la plus commode.

Le critère, je ne dirai pas de la vérité absolue, que nous ne posséderons jamais, mais de la part de vérité qui nous est accessible, est donc dans l'observation et l'expérimentation des phénomènes. Ceux-ci une fois bien établis, la narration qui en expose un est une *loi particulière*, et celle qui en relie plusieurs est une *loi générale;* et cette dernière est valable dans la mesure où elle englobe les faits expérimentaux relevant des diverses lois particulières.

A cet égard, la théorie de la relativité a offert jusqu'ici trois occasions de vérification. La première, à posteriori consistait à expliquer le mouvement de Mercure. En second lieu, elle annonçait la déviation des rayons lumineux par les champs puissants de gravitation, qui fut vérifiée avec un plein succès. Enfin, le déplacement des raies du spectre dans la lumière émise par le Soleil n'a pas encore pu, en raison de sa faiblesse, être mis en évidence d'une manière concluante.

Or, pour les deux premières vérifications, il est possible d'opposer à Einstein des formules également satisfaisantes, imaginées, les unes par Painlevé, et les autres par Gaston Bertrand (Académie des sciences, 21 août 1921). Mais cela ne constitue pas un fait troublant, car, suivant la remarque très importante d'Emile Picard (1), les lois ainsi présentées « ont évidemment un caractère artificiel et ne se rattachent pas, comme il arrive pour l'application faite par Einstein, à une théorie générale conçue sans souci du cas particulier à expliquer ».

Reste la troisième prévision d'Einstein, ainsi formulée par Painlevé :

« 1° Les vibrations lumineuses d'un même atome doivent

(1) Article publié dans l'*Annuaire du Bureau des longitudes pour 1922*, et résumé à l'Académie le 9 janvier 1922.

être plus courtes près du Soleil que sur la Terre (le ralentissement étant le même pour tous les atomes) ;

« 2° Nos solides, dits invariables, nos mètres en particulier, doivent se raccourcir tous dans le même rapport dans la direction du Soleil, quand ils sont plus près de celui-ci. » (*Comptes rendus de l'Académie*, p. 679.)

C'est contre ces conclusions que s'élève Painlevé. Il leur objecte que, parmi les formules, indiquées par lui, qui satisfont aux vérifications précédentes, les unes laissent les vibrations et les longueurs inchangées, et les autres les font varier en sens inverse de celui annoncé par Einstein ; et il ajoute (p. 680) :

« Lors même que la formule 1 [*celle d'Einstein*] serait *imposée* sans aucune ambiguïté par la doctrine einsteinienne de la gravitation et de la propagation de la lumière, les conclusions que je viens d'énoncer m'apparaîtraient comme des conjectures des plus audacieuses, et non pas comme des conséquences inévitables de cette doctrine, qui suffiraient (comme l'affirme Einstein avec sa magnifique franchise) à la faire crouler si elles ne se vérifiaient pas.

« Mais l'existence de la formule 2 [*une de celles de Painlevé*] et d'une infinité d'autres possibles me paraît suffire à démontrer le caractère plus qu'aventureux de telles prévisions. »

C'est à ces mêmes prévisions qu'il faisait allusion plus haut (p. 678), en écrivant :

« Les doctrines d'Einstein, dont j'admire profondément l'audace de pensée et la puissance constructive, conduiront-elles à abandonner définitivement le postulat fondamental de la mécanique newtonienne ? Je crois au contraire qu'il subsistera de ces doctrines un corps de formules qui, sans la contredire, se fondra dans la science classique, mais que ne subsisteront pas les principes ou conséquences philosophico-scientifiques qui ont été, suivant les jugements, le scandale ou le miracle de la théorie de la relativité. »

Enfin, il termine sa seconde communication par ces mots :

« Mais si intéressantes qu'elles soient, ces conceptions métaphysiques scientifiques peuvent crouler, sans que soit détruite la théorie positive de la gravitation, construite par Einstein ».

Comment se fait-il que certains aient parlé à ce propos de la « réfutation » d'Einstein par Painlevé et de la revanche des « newtoniens » sur les relativistes ? Vraisemblablement, il s'agissait pour eux de justifier l'assertion téméraire qu'ils avaient émise en disant qu'Einstein avait démoli Newton. On voit, en effet, en quelle haute estime Painlevé tient Einstein et combien nettement il dit que sa « théorie positive de la gravitation » s'incorporera dans la science classique, qu'elle ne fait que développer. Et même, il se montre plus einsteinien qu'Einstein, puisqu'il déclare, contrairement à ce que celui-ci reconnaît « avec sa magnifique franchise », que la non-vérification de la troisième prévision n'entraînerait pas la ruine du système.

***

Mais, cela dit, on est obligé de constater que les textes cités sont assez confus, même contradictoires, et qu'ils semblent dénoter trop de confiance dans la vertu inventive du calcul.

Voici, en effet, quelle est la situation.

Einstein, ayant édifié une théorie générale, en tire trois prévisions, qu'il soumet à la vérification des astronomes et des physiciens.

Painlevé et Bertrand donnent des formules qui aboutissent aux mêmes prévisions dans les deux cas dont la vérification expérimentale est acquise, mais annoncent un résultat nul, ou même de sens opposé, pour l'observation très délicate qui reste encore douteuse.

Dans ces conditions, si le débat était purement mathématique, il pourrait se poursuivre indéfiniment, c'est-à-dire que l'on serait libre de choisir entre les formules proposées. Mais il est physique et, par conséquent, justiciable de l'expérience seule : à elle de conclure.

En ce qui concerne le raccourcissement des mètres à l'approche des champs intenses de gravitation, il est difficile d'imaginer comment on pourra le vérifier directement. Mais il est intimement lié au ralentissement des vibrations ; ce sont en quelque sorte deux faces d'une même question, et l'on peut donc estimer que la vérification de l'une suffirait pour entraîner la conviction en ce qui concerne l'autre.

Or, on a vu, au paragraphe 33, combien difficile est cette vérification, dans les conditions où elle a pu être tentée jusqu'ici. On ne connaissait que la masse d'une seule étoile, le Soleil ; et, bien que cette masse soit 324 000 fois celle de la Terre, elle ne permet de prévoir, pour une raie de spectre, qu'un décalage d'un milliardième de millimètre ! Comme d'autre part on estimait que le Soleil est une étoile d'une bonne grosseur moyenne, on n'avait guère d'espoir de pouvoir observer une déviation notablement plus forte.

Mais voici que, depuis 1921, nous savons que le Soleil n'est qu'une très petite étoile : Bételgeuse est 27 millions de fois plus grosse, et Antarès, 113 millions de fois (1). Sans doute, nous ne connaissons pas encore la masse de ces étoiles. Mais ce n'est pas s'avancer trop que de dire qu'elle est énormément supérieure à celle du Soleil. La densité de celui-ci est en effet le quart de celle de la Terre, soit 1,4 par rapport à l'eau, 1 082 par rapport à l'air. Pour que la masse d'Antarès ne fût pas supérieure à celle du Soleil, il faudrait, si par exemple cette étoile n'était constituée que d'air pur, que sa densité fût 113 millions de fois moindre que celle de l'air, ce qui représenterait le vide à moins d'un

(1) Il est intéressant de chercher à se figurer les rapports de ces dimensions. Si, par exemple, nous représentons la Terre par une bille de 1 centimètre de diamètre, le diamètre du Soleil sera de 1 m. 09 ; celui de l'orbite terrestre, 232 mètres ; celui de Bételgeuse, 327 mètres ; celui d'Antarès, 526 mètres.

La distance de cette dernière étoile est telle que sa lumière met 370 ans à nous parvenir ; c'est deux millions de fois la distance qui nous sépare du Soleil ; à l'échelle ci-dessus, c'est-à-dire en figurant la Terre par une bille de 1 centimètre, cela représenterait 232 000 kilomètres.

A cette distance, ce globe énorme nous apparaît sous un angle de 39 millièmes de seconde ; c'est l'angle sous lequel on verrait un homme à la distance de 9 250 kilomètres, — s'il était assez lumineux pour qu'on pût l'apercevoir !

cent-millième d'atmosphère ; c'est là, on en conviendra, une supposition peu vraisemblable.

Il me semble donc qu'on peut poser aux astronomes les deux questions suivantes :

Est-il actuellement possible d'évaluer la masse de Bételgeuse, ou, préférablement encore, celle d'Antarès ?

Est-il possible d'isoler les spectres de ces étoiles dans des conditions qui permettent d'y déterminer avec précision la position des raies ?

Si la réponse à la première question est affirmative, on pourra calculer, par la formule d'Einstein, la valeur de la déviation à prévoir ; au cas contraire, on a au moins tout lieu de penser que cette valeur sera très supérieure à celle annoncée pour le spectre solaire et qu'on pourra donc constater l'existence d'une déviation notable, confirmant la théorie d'Einstein.

Fait remarquable : par une marche inverse à celle suivie pour le spectre solaire, *la mesure de cette déviation fournira alors un moyen d'évaluer la masse des étoiles*, ou tout au moins son ordre de grandeur.

En résumé, il ne suffit pas de dire, comme Painlevé : « Ma conclusion, c'est que c'est pure imagination de prétendre tirer du ds^2 (1) des conséquences de cette nature. » Ces conséquences sont des prévisions offertes à la vérification ; il faut les vérifier. Ainsi que l'a fait remarquer ensuite Émile Picard, certains, « attachés aux idées traditionnelles, ne prennent pas facilement leur parti d'une sorte de rupture avec le sens commun. L'avenir dira dans quelle mesure, si de nouveaux faits expérimentaux leur apportent leur appui, les idées nouvelles pourront s'incorporer dans ce bon sens moyen de l'humanité, où Descartes mettait le fondement de la certitude, et qui était pour lui le trait d'union entre notre pensée et le réel ».

Ici encore, il faut crier casse-cou. Descartes dit : « le bon

(1) [Le symbole ds^2 joue un rôle fondamental dans la théorie de la relativité. C'est le carré de la variation de l'« intervalle » dont il a été question au paragraphe 25.]

sens, ou raison » ; et le bon sens se définit : « la saine et droite raison ». Ne confondons pas cette faculté souveraine avec le sens commun, qui n'est que « l'intelligence et la lumière ordinaire avec laquelle naissent la plupart des hommes » ; ne prenons pas le sens commun pour juge d'une théorie scientifique ; ne craignons pas de rompre avec lui : cela nous est arrivé déjà si souvent ! Au temps de Copernic, le sens commun repoussait l'existence des antipodes. Depuis un siècle, il a dû subir mille nouveautés choquantes, jusqu'à la pesanteur de la lumière. Un homme doué seulement de sens commun ne manquera pas de penser qu'à force de couler dans la mer, les fleuves la transformeront en un lac d'eau douce. Avec un peu de réflexion, on se rend compte que l'eau des premiers océans, provenant des pluies, était douce ; que les fleuves y ont apporté des sels dissous à la surface des terres, et qu'ils continuent d'en apporter ; qu'enfin, l'évaporation aidant, la salure des mers va donc en augmentant. Le bon sens, ou raison, nous dit donc que les fleuves d'eau douce ne cessent de saler la mer — ce qui n'a pas le sens commun !

Voilà qui montre qu'il faut savoir prendre son parti de certaines ruptures avec le sens commun. L'analyse spectrale nous dira s'il doit s'incliner devant la troisième prédiction d'Einstein.

* * *

Je ne puis clore ce paragraphe consacré à l'Académie des sciences, sans parler de la séance du 6 février, où Léon Lecornu a mentionné mon volume *la Relativité des phénomènes*.

J'y avais réfuté (p. 311) une confusion étrange dans laquelle il était tombé en opposant à la théorie de la relativité une objection insoutenable. Pour défendre cette objection, il soumit à l'Académie un autre exemple, où son erreur ressort plus clairement encore. Il s'en prend, en effet, au troisième des énoncés du principe de Galilée qui sont donnés plus haut (§ 10, C), et déclare que c'est une « formule inexacte ». Pour le démontrer, il considère deux observateurs, supposés à l'état de mouvement relatif rectiligne uniforme ; puis, il fait tourner l'ensemble de leurs systèmes autour d'un axe solidaire de l'un d'eux ; et il constate alors l'intervention d'une force centrifuge, constante pour cet observateur et variable pour l'autre. D'où la conclusion qu'ils formuleront différemment une même loi physique.

Cela est incontestable ; seulement, c'est en dehors de la question. Quand on dit que « les lois physiques sont les mêmes pour des observateurs qui sont l'un par rapport à l'autre à l'état de translation relative uniforme », on entend que, étant donné un ensemble de systèmes physiques en mouvement rectiligne uniforme, les uns par rapport aux autres, aucun d'eux ne jouit de propriétés qui l'imposent comme système de référence; ou, suivant deux expressions abrégées d'Einstein, aucun d'eux n'est *privilégié*, ils sont *équivalents*. Mais, dans l'exemple donné, on considère trois systèmes, sur lesquels deux seulement sont en état de translation relative uniforme, le mouvement du troisième étant une rotation par rapport à eux.

Ce qu'on peut dire du mouvement circulaire, c'est ce qui suit. Considérons deux systèmes à l'état de translation relative uniforme ; et soit, dans chacun d'eux, un observateur tournant autour d'un axe. Il se produira chez chaque observateur une force centrifuge, que tous deux seront d'accord à déclarer constante ou variable, selon que le rayon, au point considéré, est constant ou variable. La loi du mouvement circulaire sera donc bien la même à leurs yeux.

Bref, la théorie de la relativité concerne des systèmes placés dans certaines conditions, et Lecornu raisonne sur une donnée différente : rien d'étonnant à ce qu'il ne soit pas d'accord avec Einstein.

Notons enfin que cette Communication est complétée par un calcul destiné à établir une loi différente de celle d'Einstein, et qui rende compte de la rotation de l'orbite de Mercure, ainsi que de la déviation des rayons lumineux. Mais elle est difficile à appliquer. Une hypothèse que l'auteur emploie à cet effet implique non seulement que le diamètre solaire soit 25 fois plus petit que dans la réalité (soit une masse 15 625 fois moindre), mais encore que le sens du déplacement du périhélie de Mercure soit changé ; d'où il conclut : « Cette divergence montre que, dans le voisinage immédiat du Soleil, les phénomènes sont plus compliqués que nous ne l'avons supposé en dernier lieu. » Il est permis de penser que sa loi mérite, mieux que toute autre, qu'on lui reconnaisse un « caractère artificiel », selon le mot d'Émile Picard, cité plus haut.

35. — Sur l' « Univers à quatre dimensions ».

Lorsque Minkowski eut le grand mérite de déterminer une unité de temps homogène à l'unité de longueur et pouvant donc entrer au même titre dans les calculs, il eut un mot malheureux : il dit que l'Univers est un continu à quatre dimensions. Et, depuis lors, les auteurs répètent à l'envi que « l'Univers est à quatre dimensions ».

C'est là restreindre singulièrement la conception que l'on doit se faire de l'Univers ; c'est prendre la partie, une toute petite partie, pour le Grand Tout. Dans cet ordre d'idées, tout ce qu'il était permis de dire, c'est que, dans l'Univers, les quatre dimensions : longueur, largeur, hauteur et temps forment un continu.

L'Univers, en effet, est un ensemble de phénomènes dont le moins qu'on puisse dire est qu'ils sont innombrables. Nous n'en percevons qu'un nombre infime, soit que ces phénomènes soient trop éloignés dans l'espace et le temps, soit que, se produisant à nos côtés ou en nous-mêmes, ils échappent à nos sens et même à nos moyens d'observation indirecte. Et même cette partie que nous percevons est bien trop vaste et complexe pour que notre faible entendement puisse l'embrasser dans son ensemble : pour l'étudier, nous sommes réduits à en isoler par la pensée un très petit nombre de manifestations, que nous considérons à l'exclusion de toutes les autres.

Qu'est-ce, par exemple, que la plus simple des sciences de la nature, la géométrie ? — L'étude des formes, indépendamment de toutes les autres propriétés qu'un corps peut manifester ; elle porte sur les trois dimensions de l'espace, à l'exclusion de toutes autres ; et l'on est fondé à dire que l'Univers, considéré du seul point de vue de la forme, c'est-à-dire le monde de la géométrie, est à trois dimensions.

Etudions maintenant le mouvement. Nous n'avons plus seulement à mesurer des formes rigides, mais à suivre des points qui se déplacent en parcourant ces formes, ou bien à observer les variations, les déformations des lignes et des surfaces qui limitent une forme primitive ; et nous voyons intervenir la variable temps, qui s'ajoute aux trois précédentes. L'Univers, considéré sous son seul aspect mouvement, c'est-à-dire le monde de la cinématique, est à quatre dimensions. Ce que Minkowski appelle, avec trop de grandiloquence, l'Univers, se réduit au monde de la cinématique. Aussi devrait-on modifier comme il suit la nomenclature donnée par lui et que les auteurs ont conservée jusqu'ici : au lieu de « point d'Univers » et « ligne d'Univers », dire *point cinématique* et *ligne cinématique* ou, si l'on veut, *point* et *ligne d'espace-temps*.

Élevons-nous d'un échelon, et nous arrivons à la dynamique. La dimension masse s'ajoute aux précédentes, et nous avons un monde à cinq dimensions. Pareillement, le monde de la thermodynamique, qui comporte la dimension température, est à six dimensions, et ainsi de suite. En fin de compte, si l'on pouvait mettre l'Univers entier en équations, celles-ci seraient à n dimensions, le nombre n étant pratiquement infini.

Chacun de ces mondes contient tous ceux qui ne possèdent qu'une partie de ses dimensions, et qui s'en déduisent fort simplement, par la fixation des dimensions devenues superflues. Considérons par exemple l'équation qui définit la propagation d'une onde, et supposons que le mouvement s'arrête à un instant donné ; il nous suffit pour cela, de donner à la variable temps une valeur déterminée ; — c'est ce qu'Einstein appelle, en termes pittoresques, exécuter une photographie instantanée du mobile. L'onde étant une sphère dont le rayon croît continûment, l'équation restante sera celle de la sphère correspondant à l'instant considéré : en arrêtant le cours du temps, nous avons passé de la cinématique à la géométrie, et constaté que le monde géométrique, à trois dimensions, est contenu dans le monde de la mécanique (1).

On ne saurait opposer valablement à ces vues que les dimensions supplémentaires ainsi considérées se ramènent en définitive aux trois dimensions fondamentales de la physique: longueur, masse et temps. Car, précisément, loin de renforcer la conception de l'Univers à quatre dimensions, cette objection même la ruinerait, puisqu'elle obligerait tout au moins à tenir compte d'une cinquième dimension, la masse. D'autre part, Minkowski, en montrant que le temps est homogène à la longueur, a réduit les dimensions fondamentales à deux (sinon dans la réalité concrète, du moins au point de vue algébrique) ; et le même résultat sera peut-être obtenu demain pour la masse. Enfin, on ne peut pas enlever leur individualité aux phénomènes physiques ; la chaleur, par exemple, est bien équivalente à de l'énergie, c'est-à-dire à quelque chose qui peut s'exprimer au moyen de longueur, masse et temps ; mais l'énergie se manifeste encore sous quantité d'autres formes ; et, si l'on étudie un problème dans lequel la chaleur joue un rôle, on est obligé de le marquer en faisant intervenir la dimension qui la caractérise. Et de même pour tout autre phénomène.

L'assertion que l'Univers est à quatre dimensions, déjà passée à l'état de lieu commun, a donc beau avoir fait une fortune rapide : elle ne signifie rien.

36. — Sur la « relativité de la géométrie »

Une théorie qui, comme celle de l'Univers à quatre dimensions, a rencontré un succès injustifié, est celle de la relativité de la géométrie.

— Considérez, nous dit-on, une aire horizontale, et tracez-y deux droites dirigées vers le Nord. Elles seront parallèles, à nos yeux. Mais prolongez-les indéfiniment, et vous constaterez que ce sont des méridiens, concourant aux

(1) [On l'obtient en coupant le monde cinématique par le plan $t=a$.]

pôles. Croyant mener des droites à la surface du globe, nous n'arrivons qu'à y tracer des cercles.

De même, proposez-vous d'élever une tour carrée, aux arêtes parfaitement parallèles. Ces arêtes, dressées au fil à plomb, divergeront en l'air, et leurs prolongements se couperont au centre du globe. Croyant élever des parallèles dans l'espace, nous produisons des droites concourantes.

Une bille roulant librement sur un plan y suit le chemin le plus court d'un point à l'autre, c'est-à-dire la ligne droite. A la surface de la terre, supposée sphérique, le chemin le plus court d'un point à un autre est ce qu'on appelle une *ligne géodésique ;* c'est l'arc de grand cercle passant par ces deux points ; et, si ceux-ci sont diamétralement opposés, tous les méridiens passant par ces deux pôles sont également qualifiés : il y a, dans ce cas, une infinité de chemins égaux, plus courts que tous les autres. Mais en réalité, la terre est irrégulièrement bosselée ; une bille, roulant sur le sol par le chemin le plus court, suit donc une ligne géodésique extraordinairement capricieuse.

De même encore, un rayon de lumière se rend d'un point à un autre par le chemin le plus court, c'est-à-dire en ligne droite. Mais cela n'est vrai que dans cet espace théorique, vide et libre de toute gravitation, qu'Einstein appelle « galiléen ». Dans l'Univers réel, contenant de place en place des champs de gravitation, c'est-à-dire dans l'espace einsteinien, la lumière est déviée de sa route rectiligne ; le chemin le plus court n'est pas une ligne droite, mais une ligne que, par analogie, on appelle « géodésique ». Et ce parcours est encore compliqué par l'influence de la réfraction, due à la traversée des milieux hétérogènes.

On conclut de là que l'espace galiléen est le seul dans lequel on puisse tracer des figures satisfaisant à la géométrie classique, ou géométrie d'Euclide ; mais que, dès l'instant que la gravitation intervient, ces figures sont déformées, et la géométrie euclidienne n'est plus valable ; que l'espèce de géométrie convenant en un lieu donné est donc imposée par les conditions de la gravitation en ce lieu ; bref, que « la géométrie est fonction de la gravitation ». Il n'existe guère d'ouvrage consacré à la relativité qui ne donne de longs développements à cet énoncé stupéfiant.

— Eh bien, il faut avoir le courage de dire qu'il n'y a là que sophismes et jeux de mots. On s'en convaincra facilement, en se reportant à ce qui a été dit, au paragraphe précédent, au sujet des divers mondes qui sont, en quelque sorte, emboîtés les uns dans les autres, et dont l'ensemble constitue l'Univers.

La géométrie est, par définition, le monde des formes pures, considérées en faisant abstraction de toute qualité autre que les dimensions linéaires. Elle implique donc, entre autres, ces trois conditions essentielles :

L'espace dont elle s'occupe est *homogène*, c'est-à-dire partout identique à lui-même (aucun point n'y est privilégié) ;

Cet espace est *isotrope*, c'est-à-dire que toutes les droites passant par un même point sont identiques (aucune direction n'est privilégiée) ;

Une figure géométrique est donc *indéformable*, c'est-à-dire qu'elle se maintient telle qu'on l'a construite, et peut être transportée de toutes pièces dans une région quelconque sans subir de modifications.

Les figures de la géométrie, en un mot, sont supposées immatérielles ; elles sont, en quelque sorte, faites d'un cristal impondérable, insensible à toute action extérieure.

Il est bien évident que, du moment qu'on fait entrer en jeu une quelconque des propriétés de la matière, comme la masse (et par conséquent la gravitation), l'élasticité, la chaleur, l'électricité, etc., la figure considérée, se trouvant pourvue d'un corps matériel, est devenue sensible aux actions extérieures ; elle cesse d'être un objet géométrique pour devenir un objet physique et, dès lors, les lois de la physique s'ajoutent, en ce qui la concerne, à celles de la géométrie ; elles ne les détruisent pas, elles se composent avec elles.

Autrement dit : la géométrie suppose que, dans l'espace tout entier, on jouit d'une liberté absolue pour le tracé des figures, et l'intervention de toute propriété physique consiste à apporter une certaine restriction à cette liberté ; mais cette restriction s'opère en respectant les lois de la géométrie et consiste simplement à remplacer une figure géométrique par une autre.

Par exemple, nous pouvons concevoir une sphère reposant sur un plan et n'ayant avec lui qu'un point de contact. Nous pouvons aussi réaliser une sphère d'acier et la poser sur le sol; mais il faut nous rendre compte que, sous l'influence du poids de l'acier, la sphère et le sol seront déformés, si peu que ce soit, et auront une petite surface de contact. Enfin, essayons de constituer notre sphère en sable ou en goudron, et nous n'y parviendrons pas. Mais on aurait vraiment tort de conclure de là que la pesanteur empêche la sphère d'être une surface dont tous les points sont à égale distance du centre.

Autre exemple. Prenez 100 cubes géométriques, ayant chacun 1 mètre de côté, et superposez-les : vous aurez construit un parallélépipède droit, haut de 100 mètres. Mais remplacez ces figures idéales par des cubes en granit. Chacun d'eux pèsera 2800 kg. et comprimera le sous-jacent, qui sera déformé, si peu que ce soit. Au lieu de 100 de ces cubes, prenez en 4000. Le poids total sera de 11 200 tonnes, et la pression de 1 120 kg. par centimètre carré; et comme la résistance du granit à l'écrasement est de 1 100 kg. le poids de cette tour de Babel en écrasera la base. Cela, bien entendu, à supposer que le sol lui-même soit encore plus résistant que le granit. En réalité, un très bon sol pouvant porter 10 kg. par centimètre carré, nous ne pourrons pas superposer plus de 35 cubes, à moins de répartir la pression sur de larges fondations.

Or, quel homme de bon sens conclura de là que la gravitation a pour effet d'empêcher qu'en mettant bout à bout 100 droites, longues de 1 mètre chacune, on obtienne une droite longue de 100 mètres ?

On voit quel est le sophisme des raisonnements cités plus haut. Il consiste à raisonner géométriquement sur des prémisses contenant des faits physiques, alors que le raisonnement géométrique doit négliger, par principe, tous les faits de ce genre. Rien d'étonnant à ce qu'on aboutisse de la sorte à des conclusions incompatibles avec la géométrie euclidienne, c'est-à-dire avec la géométrie tout court.

Ainsi, dans le premier exemple donné plus haut, on trace deux droites parallèles en les orientant vers le Nord ; mais nous savons à priori que cette construction n'est valable qu'en première approximation, sur une longueur suffisamment faible, et que ces lignes concourent au pôle. En outre, on les a supposées tracées sur un plan, qu'on identifie avec le sol, alors que celui-ci n'est pas plan. Or, nous savons bien que, si le plan des deux droites est réellement un plan, au sens géométrique du mot, il ne coïncide pas avec la surface terrestre, mais lui est tangent ; ce cas est le même que celui du pont et du tunnel dont nous parlions au paragraphe 5.

Ce qui fausse la construction, ce n'est pas que la géométrie ait cessé d'être valable, mais qu'on se soit imposé la condition de rester à la surface du sol, alors que toute limitation de la liberté de construction est incompatible avec la géométrie pure.

On raisonnerait de même pour rectifier les autres exemples.

Quant au jeu de mots qu'on est fondé à reprocher à cette « relativité de la géométrie », il consiste à confondre l'idée de ligne droite, c'est-à-dire de *chemin le plus court entre tous les chemins imaginables*, avec celle de ligne géodésique, c'est-à-dire de *chemin le plus court qui soit permis par les circonstances*. Le touriste qui veut traverser une vallée, de crête en crête, par le chemin le plus court, décrit une ligne géodésique (s'il le peut, c'est-à-dire s'il ne rencontre pas de pentes trop fortes, ni d'obstacles à contourner) ; la ligne droite, d'un point à l'autre, n'en existe pas moins, et elle est plus courte que la géodésique ; tout ce qu'on est en droit d'en dire, c'est qu'elle n'est pas praticable, physiquement. Elle peut d'ailleurs le devenir, par le moyen d'un transbordeur ou d'un aéroplane.

Il est parfaitement exact que, dans l'espace einsteinien, qui n'est ni homogène, ni isotrope, un mobile ne peut pas suivre la ligne droite qu'il parcourrait dans un espace galiléen ; ou, du moins, il ne la suit qu'en première approximation, sur un trajet suffisamment court. Mais cela n'infirme pas plus la géométrie euclidienne que ne le fait la réfraction d'un rayon lumineux dans l'atmosphère; c'est même cette géométrie qui permet de formuler les lois de la réfraction, et c'est elle aussi qui nous définit la trajectoire d'un rayon dévié par la masse du Soleil. On n'a donc pas le droit de dire qu'il faille employer, en chaque lieu, une géométrie spéciale, selon la situation et la puissance des champs de gravitation qui s'y font sentir. Ce qui varie d'un lieu à l'autre, ce n'est pas la géométrie, ce sont les déviations et déformations que subissent les corps matériels et qui sont précisément rendues mesurables par la géométrie.

Bref, la géométrie, comme l'arithmétique, reste absolue; c'est son application aux sciences physiques qui est relative. Ou encore : la géométrie, science du monde des formes pures, n'est applicable au monde physique qu'en première approximation.

37. — Sur « l'Univers courbe et fini ».

Voici encore une notion mathématique plutôt troublante, à laquelle on a eu le tort de vouloir attacher une représentation physique qui dépasse les bornes de l'entendement humain.

On a vu, au paragraphe 24, comment la géométrie à *n* dimensions est provenue, par voie de généralisation, de la géométrie cartésienne. Mail il existe en outre des géométries d'aspect plus paradoxal encore, et qu'on nomme *non euclidiennes*, parce que la première, due à Lobatchevski, est fondée sur la proposition inverse du postulat d'Euclide, en disant : « Par un point, on peut mener plusieurs parallèles à une droite donnée. » Une autre, de Riemann, admet que « dans certains cas, on peut faire passer par deux points une infinité de droites ». Il en a été conçu d'autres encore et, si étrange que cela puisse paraître, ces hypothèses, opposées à notre expérience — et je dirai presque à notre bon sens — ont conduit à des résultats importants.

Riemann, notamment, est arrivé ainsi à la notion d'un « espace courbe » doué de propriétés naturellement très différentes de celles que nous constatons autour de nous, dans notre « espace plan ». C'est là un ordre d'idées dans lequel nous ne saurions entrer ici. Il nous suffira de dire que ces propriétés sont précisément celles que posséderait l'espace einsteinien, considéré dans son ensemble ; que l'action de la gravitation, qui s'exerce dans des régions disséminées de l'Univers, est assimilable à celle du rayon de courbure d'une surface, qui détermine la ligne géodésique suivie par un point astreint à parcourir cette surface ; enfin, qu'Einstein conclut de là que l'Univers perceptible est *illimité, mais non infini*.

On peut faire saisir cette notion en la rapprochant d'une autre, imaginée jadis par Helmholtz et devenue classique dans la géométrie des surfaces. Supposons des êtres infiniment plats vivant à la surface d'une sphère, dans un brouillard qui leur déroberait toute vue sur l'extérieur. Ils n'auraient aucune notion de la troisième dimension, aucune sensation de relief. Pour eux, l'Univers se réduirait à leur surface sphérique, sur laquelle les arcs de grand cercle, ou géodésiques, joueraient le rôle de nos droites. Cet Univers serait *sans limites;* car, si l'on partait d'un point quelconque, dans une direction quelconque, en suivant la « ligne droite », on se trouverait ramené au point de départ sans avoir jamais rencontré d'extrémité. Et pourtant il serait *fini;* car ses habitants pourraient y tracer un quadrillage par méridiens et parallèles, ou par deux séries de méridiens ou de parallèles, et le diviser ainsi, au moyen d'opérations géodésiques, en un nombre fini de carreaux mesurables.

C'est à une notion de ce genre qu'aboutit l'analyse d'Einstein. L'espace y est caractérisé, en chaque point, par une courbure déterminée, imposée aux lignes qui, à notre échelle et dans notre monde à gravitation faible, nous apparaissent comme droites. Un rayon lumineux se propage suivant une ligne géodésique qui prend successivement la courbure correspondant à chacun des lieux qu'elle traverse et qui, arrivée à une certaine distance du point de départ, y est en quelque sorte réfléchie et ne peut donc pas se propager jusqu'à l'infini.

Tout cela est parfait, tant qu'il ne s'agit que d'établir une formule mathématique générale plus approchée que les précédentes, c'est-à-dire rendant compte d'un plus grand nombre de phénomènes. On arrive ainsi à une vue d'ensemble, à une synthèse très audacieuse, commode pour le mathématicien. Celui-ci peut ainsi avoir le choix entre deux représentations : celle de l'Univers infini et celle de l'Univers illimité mais fini, et il se décidera entre elles selon le problème à traiter. Ces conceptions, en effet, sont moins dissemblables qu'on ne le croirait au premier abord, car leur divergence ne se manifeste qu'à une distance, dans l'espace ou dans le temps, qui nous est inaccessible ; et, tant que l'on ne considère que des phénomènes qui ne dépassent pas trop notre échelle, les choses reviennent au même : c'est ainsi qu'une ellipse, courbe fermée, et une parabole, qui se prolonge à l'infini, peuvent nous paraître confondues sur un assez long parcours.

Mais, justement, il faut distinguer entre les formules de mathématiques pures et celles qui cherchent à représenter, autant que cela se peut, les phénomènes physiques. Les premières, déterminées par un petit nombre de conditions, sont valables indéfiniment. Une ellipse et une parabole sont déterminées, chacune, lorsqu'on en connaît cinq points. Donnez-leur quatre points communs, répartis dans toute l'étendue de l'Univers perceptible, et les deux courbes seront confondues sur tout ce parcours immense ; elles n'en seront pas moins distinctes pour le géomètre, qui sait que, plus loin, elles divergent. Mais il n'existe ni ellipses ni paraboles dans la nature, où le moindre phénomène est soumis à des multitudes de causes principales ou perturbatrices ; il n'existe que des courbes qui, sur des arcs plus ou moins longs et selon l'approximation voulue par les circonstances, peuvent être confondues avec des courbes géométriques. La formule par laquelle on cherche à représenter un phénomène n'est donc valable qu'entre des limites qui dépendent de l'extension de ce phénomène dans l'espace ou dans le temps. C'est ainsi que la surface terrestre est plane pour l'architecte, sphérique pour le fabricant de globes terrestres, ellipsoïdale pour le géodésien, et tout à fait irrégulière pour le topographe et l'ingénieur ; chacun d'eux a raison de son point de vue, sans compter l'astronome qui, dans sa Mécanique céleste, peut réduire le globe entier à un point matériel.

Que l'on parle donc d'espace courbe et d'Univers fini, entre mathématiciens, dans des calculs destinés à faire ressortir quelque haute généralisation nouvelle ; que l'on dise : « Dans l'état actuel de nos connaissances, on peut raisonner sur la partie de l'Univers qui nous est sensible directement ou indirectement, comme si elle était sphérique », — rien de mieux. Mais que l'on énonce ces choses comme des vérités physiques désormais acquises, cela est abusif.

C'est une dangereuse illusion de croire que le calcul puisse établir une loi physique : l'expérience seule en est capable. L'analyse mathématique est un mode de raisonnement abrégé, un langage commode et précis, qui permet de faire ressortir un nouvel aspect des choses : mais cet aspect était contenu dans les données que le calcul a malaxées et transformées.

C'est ce qu'un de nos maîtres de jadis, Jean Moutier, exprimait fort justement en ces termes : « On compare souvent l'analyse à un moulin; mettez-y du blé, vous aurez de la farine. »

Par exemple, les conclusions physiques de la théorie de la relativité ne sont pas les produits arbitraires de je ne sais quelle abstraction de quintessence; la relativité du temps et de la longueur découlent directement de l'expérience de Michelson et du principe de Galilée, lequel est une loi expérimentale approchée; et l'équivalence de la masse et de l'énergie résulte des expériences faites, sur les courants électriques et sur la pression de radiation. Quant à l'hypothèse de l'Univers sphérique, elle est fondée sur un postulat suivant lequel une sphère, même de rayon infini, ne saurait contenir une masse infinie; et nous sommes, ici, en pleine hypothèse gratuite, tant que l'on n'aura pas vérifié, soit que la masse de l'Univers est limitée, soit qu'il en est ainsi de son rayon, la réalité de l'une des deux assertions devant d'ailleurs entraîner la réalité de l'autre. Or, sur ce point, je m'en tiendrai à ce que j'écrivais dans la *Relativité des phénomènes :*

« Par définition, la question de savoir si l'Univers est infini ou sphérique est à jamais invérifiable. Dans l'une et l'autre hypothèses, on ne peut que dresser un procès-verbal de carence, ainsi conçu : « De toutes les recherches faites, il résulte que nous n'avons pas trouvé le bout du monde ! » Mais cela tient-il à ce que ce « bout du monde » est trop loin (Univers infini), ou à ce que nous errons dans un labyrinthe (Univers sphérique), — on ne peut concevoir aucune expérience qui permette de choisir. »

* * *

Au moment même où ces dernières lignes paraissent, un auteur s'est efforcé de concilier ces contraires : l'Univers fini et l'Univers infini, au moyen d'une hypothèse qui a séduit quelques esprits enclins au merveilleux.

Ainsi qu'on l'a vu au paragraphe 22, ce que nous distinguons par les deux noms de « matière » et « énergie » ne constitue que deux manifestations d'une même substance, à laquelle nous pouvons donner le nom d' « éther », qui est commode, en raison même de son imprécision.

Cela posé, tout notre univers sensible, depuis la Terre jusqu'à la nébuleuse la plus lointaine, ne serait qu'une « bulle d'éther », flottant dans un espace vide d'éther, mais garni de « suréther » ; et l'auteur ajoute : « D'autres univers, peut-être, palpitent au delà, et ces mondes sont à jamais, pour nous, comme s'ils n'existaient pas. » Ainsi, notre univers serait fini, mais le Grand Tout pourrait fort bien être infini.

Cette idée est loin d'être nouvelle ; elle a été présentée par Poincaré à la Société astronomique de France en 1903, et encore n'a-t-il fait que l'illustrer par l'expression pittoresque de « bulles d'éther » ; car l'idée même est d'Isaac Roberts, qui l'avait émise en 1899.

Mais elle ne valait pas d'être exhumée, car elle ne constitue pas une hypothèse, au sens scientifique du mot, mais simplement une rêverie amusante. La première condition à laquelle doit satisfaire une hypothèse est en effet de reposer sur un fondement constatable, de se prêter à une vérification ultérieure ; or, ici, toute vérification est exclue à priori, par définition, puisqu'on nous parle de mondes qui nous resteront « à jamais » inconnus, faute d'un milieu intermédiaire qui puisse rien transmettre d'eux à nous. Or, si une chose est pour nous, à jamais, comme si elle n'existait pas, il est possible qu'elle intéresse le théologien, le métaphysicien et le poète, mais, pour l'homme de science, qui se refuse à suivre Aristote « en dehors de la physique », elle n'existe pas.

En résumé, cette hypothèse revient à dire que nos sens nous permettent de percevoir des phénomènes qui se passent à une certaine distance de nous et que nous ignorons ce qui se passe au delà. Il n'y a là de nouveau que les deux expression « bulle d'éther » et « suréther ».

38. — Sur la vitesse limite.

Nous arrivons enfin à une rectification qu'il est nécessaire d'apporter non à la théorie même de la relativité, mais à un détail important de ses énoncés.

On a vu au paragraphe 19 que la vitesse d'un mobile est nécessairement limitée ; et l'on a constaté, d'autre part, quel rôle considérable appartient, dans l'établissement de la théorie, à la vitesse de la lumière dans le vide, ou, pour mieux dire, dans l'espace galiléen (pour abréger le discours, nous désignerons dorénavant cette vitesse, comme le fait Einstein, par la lettre c).

Cette vitesse est, d'après Michelson, une constante universelle, quelle que soit sa direction et quelle que soit la vitesse relative de la source et du milieu traversé ou du corps rencontré; c'est pourquoi Einstein la fait servir à sa définition de la simultanéité, qui exige l'emploi d'un signal qu'aucun autre ne puisse rattraper.

Ainsi, la vitesse c est posée, à la base de la théorie, comme étant la limite que nulle vitesse ne peut franchir.

Partant de là, Einstein démontre la transformation lorentzienne, dont les formules sont telles que, si la vitesse relative des systèmes en présence vient à atteindre la valeur c, la longueur du mobile s'annule, sa masse devient infinie, et le cours du temps s'y arrête ; et, si la vitesse relative devenait encore plus grande, on arriverait à des résultats imaginaires. D'où la conclusion qu'aucune vitesse ne peut être supérieure à c.

Eh bien, il faut avoir le courage de dire que ce raisonnement ressemble fort à un cercle vicieux. Il implique, en effet, dans ses prémisses, que c est la vitesse limite ; comment donc pourrait-il servir à démontrer ce fait préexistant ? Il devait nécessairement conduire à des formules incompatibles avec l'existence d'une vitesse supérieure à c; autrement, c'est qu'on y aurait commis une erreur en cours de route.

***

D'autre part, la loi d'isotropie de la lumière, sur laquelle repose la théorie de la relativité, a été établie et vérifiée expérimentalement avec un soin qui lui donne toute certitude, dans les conditions où l'on peut observer actuellement.

Mais il faut tenir compte de ce que ces conditions sont très éloignées des grandes vitesses, pour lesquelles la théorie de la relativité est précisément faite.

Par cette expérience, on constate que la vitesse de la lumière, par rapport à la Terre, est la même à six mois d'intervalle, c'est-à-dire à deux moments où la translation terrestre se fait dans deux directions parallèles, en sens inverse; cette translation ayant une vitesse moyenne de 30 kilomètres par seconde, cela revient à considérer, par rapport à la lumière, un mobile dont la vitesse relative a varié de 60 km/sec.

Mais cette vitesse, énorme en comparaison de celles que nous savons développer, est insignifiante vis-à-vis de celle de la lumière; elle n'en est que le cinq-millième et, avec une semblable vitesse relative, les longueurs et les durées ne varient que de deux cent-millionièmes de leur valeur.

Que donnerait l'expérience de Michelson, avec un mobile dont la vitesse serait de l'ordre de grandeur de *c*, nul ne peut le savoir ; mais il est permis de penser que, dans ces conditions, la lumière cesserait d'être isotrope, et la théorie devrait être adaptée à une approximation supérieure.

***

On doit noter aussi qu'il existe au moins une vitesse sur laquelle on ne possède encore aucune donnée positive, mais qui est si grande que Newton la supposait infinie : c'est la vitesse de propagation de la gravitation.

Laplace, à la suite de son étude du mouvement appelé l' « équation séculaire de la Lune », n'a pas craint de dire que cette vitesse doit être de plus de 7 millions de fois supérieure à celle de la lumière. Cette évaluation peut paraître notablement exagérée, aujourd'hui que l'on doit à Einstein une loi de la gravitation plus approchée que celle de Newton, ainsi qu'une loi de la composition des grandes vitesses, alors que Laplace raisonnait sur les hypothèses anciennes. Mais, quoi qu'il en soit, la question n'a pas avancé d'un pas depuis un siècle. Pour pouvoir mesurer la vitesse de propagation de la gravitation, il faudrait pouvoir appliquer une méthode analogue à celle que Fizeau imagina pour la vitesse de la lumière, c'est-à-dire posséder une substance imperméable à la gravitation et pouvant donc lui faire écran. Au commencement de 1921, Majorana crut avoir pu faire absorber, par une boîte métallique, 7 dix-milliardièmes du poids d'une masse de plomb, valeur qui semble compatible avec les considérations que Laplace a développées à ce sujet. Mais, à supposer que ce résultat soit confirmé, il resterait à trouver un mode opératoire capable de fournir la vitesse cherchée au moyen d'une donnée aussi difficilement saisissable.

Tout ce que l'on peut dire, dans l'état actuel de nos connaissances, c'est que la gravitation se propage avec une vitesse extrêmement grande, mais inconnue. Affirmer, comme on l'a fait, que la vitesse de la lumière est la plus grande de toutes et que, *par conséquent*, celle de la gravitation lui est au plus égale, c'est proférer une assertion gratuite, qui peut être contredite, demain, par l'expérience ; et, si cela arrivait, beaucoup de gens rendraient la théorie de la relativité responsable d'une exagération dont il convient, au contraire, de la désolidariser. La prudence élémentaire oblige à réserver les droits de l'expérience, qui est, en physique, la maîtresse souveraine.

***

Enfin, j'estime qu'il y a quelque chose de bien troublant dans l'idée qu'un corps pondérable, fût-ce une simple radiation, puisse prendre la vitesse limite, c'est-à-dire une vitesse qui rend sa masse infinie. Car qui dit masse infinie, dit aussi énergie infinie ; et comment expliquer alors la faiblesse de la pression de radiation ? Comment expliquer que nos yeux résistent au bombardement qu'ils subissent ? Car, enfin, si petite que soit la masse initiale d'un « quantum » de lumière à l'instant où il se met en route, sa masse et son énergie deviendraient infinies au moment où il aurait pris sa vitesse de régime.

Peut-être est-il permis de conclure de là que :

Un corps doué d'inertie, en particulier la lumière, ne peut pas atteindre la vitesse limite ;

Cette vitesse limite ne peut donc être que celle de la propagation d'un effet (par exemple, celle de la propagation de la gravitation, le seul phénomène universel connu, sur la vitesse duquel on n'ait encore aucune idée).

***

A cette hypothèse j'ajouterai enfin la modification suivante, qui me semble devoir être apportée aux énoncés de la relativité, pour garantir la théorie contre toute atteinte qu'elle pourrait recevoir de l'expérience :

La lettre c *désigne, dans les formules, la vitesse maximum absolue ou, provisoirement, à son défaut, la plus grande de toutes les vitesses déterminées par l'expérience et satisfaisant à la condition d'isotropie, c'est-à-dire, actuellement, celle de la lumière dans le vide galiléen, soit 300 000 kilomètres par seconde ;*

S'il arrive que l'on constate l'existence d'une vitesse plus grande, sa valeur devra être introduite dans les calculs à la place de la précédente ;

Dès maintenant, on peut présumer que la gravitation se propage plus vite.

Mais, encore une fois, qu'on ne se méprenne pas sur l'objet de cette petite correction, ni sur la tendance des observations critiques qui la précèdent. Bien loin de contester sur aucun point la théorie de la relativité, je me suis simplement proposé :

D'une part, d'empêcher qu'on puisse la rendre responsable de certaines assertions excessives, proférées au cours de la formidable fermentation d'idées qu'elle a déterminée ;

Et, en dernier lieu, d'y introduire une précision supplémentaire, en vue de la garantir contre l'échec apparent que l'expérience pourrait lui infliger en révélant l'existence de vitesses supérieures à celle de la lumière.

CONCLUSION

En résumé, les principaux points établis par la théorie de la relativité sont les suivants :

La longueur, la durée, la masse, sont relatives, en ce sens que leur appréciation, par deux observateurs à l'état de mouvement relatif, n'est pas la même.

La relativité de la longueur entraîne celle de la forme ; la rigidité n'existe donc plus que pour les corps solidaires de l'état de mouvement de l'observateur.

De la relativité de la longueur et du temps découle celle de la vitesse et de l'accélération.

Longueur et temps sont des quantités de même espèce : il existe un équivalent linéaire du temps. La vitesse se réduit donc à un nombre abstrait.

Par suite, l'énergie est homogène à la masse, dont elle ne diffère que par un coefficient numérique. Autrement dit, la masse, comme la chaleur, a son équivalent mécanique, qui est très élevé : une masse très petite est une énorme accumulation d'énergie potentielle.

Il n'existe donc pas de différence essentielle entre la masse et l'énergie ; ce sont des manifestations différentes d'une même chose, que nous appellerons la « substance ».

Cette équivalence de la masse et de l'énergie a d'ailleurs été trouvée directement, et ce fait constitue une vérification capitale de l'équivalence de la longueur et du temps, puisque nous retrouvons ici, expérimentalement, la proposition énoncée à l'avant-dernier alinéa comme déduction de ce que la vitesse n'est plus qu'un nombre abstrait.

La masse d'un corps est la somme de toutes les énergies accumulées ; elle s'accroît par tout apport d'énergie, sous forme de mouvement, de chaleur, de lumière, d'électricité, etc. Cela se traduit d'une manière saisissante en ces termes : un corps en mouvement, échauffé, éclairé du dehors, électrisé, est plus lourd que quand il est immobile, froid, obscur, neutre.

La gravitation n'est donc pas seulement fonction de ce qu'on appelle les masses en mécanique classique ; elle résulte également de toute manifestation de l'énergie : par exemple, les choses se passent comme si deux radiations s'attiraient.

Les deux principes de conservation (masse et énergie) se fondent en un seul, celui de la conservation de la substance ; ils ne sont distincts qu'en première approximation.

Toute la mécanique classique ne reste d'ailleurs valable qu'en première approximation, pour autant qu'on peut considérer l'espace comme galiléen. Par exemple, en deuxième approximation, la règle de composition des forces et des vitesses doit être modifiée ; car la vitesse ayant une limite supérieure, il est inexact qu'en ajoutant n fois une vitesse à elle-même, on obtienne une vitesse n fois plus grande. De même, la proportionnalité de la force à l'accélération (masse classique) ne subsiste qu'au départ, tant que la vitesse est faible ; l'inertie opposée à l'accélération croît avec la vitesse acquise, jusqu'à devenir insurmontable (masse infinie), quelle que soit l'énergie mise en jeu ; la vitesse atteint alors son maximum.

On peut dire, en résumé, que la nouvelle théorie jette un pont entre l'électrodynamique et la mécanique, jusqu'ici séparées par un abîme. L'une est en effet la mécanique des radiations, l'autre celle des corps pondérables, et nous savons, maintenant, que leurs objets ne sont pas essentiellement distincts.

***

Il est juste de noter que trois, au moins, de ces notions, avaient été présentées par des précurseurs d'Einstein.

Lorentz avait émis la double hypothèse de la contraction des longueurs et du temps local, pour expliquer l'expérience de Michelson.

L'équivalence de la matière et de l'énergie résultait implicitement de la démonstration, donnée par J.-J. Thomson, qu'en électrisant un corps on en augmente la masse, et Gustave Le Bon l'avait mise en évidence expérimentalement.

Enfin, l'impossibilité, pour la vitesse, de croître au delà de toute limite, a été proclamée par Freycinet et Clémence Royer, et elle implique la relativité de la masse.

Mais il n'y avait là qu'une hypothèse arbitraire, un fait expérimental isolé et une intuition vague. Il était réservé à Einstein d'établir ces lois, avec quantité d'autres, comme les résultats logiquement coordonnés d'un système général.

***

Ce serait entreprendre une tâche aussi vaine que malaisée de vouloir classer par ordre d'importance toutes les propositions que la théorie de la relativité a rendues incontestables. Mais il en est deux que l'on doit mettre hors de pair : la relativité du temps et l'équivalence de la masse et de l'énergie.

Que deux observateurs puissent légitimement affirmer : l'un, que deux événements sont simultanés, et l'autre, qu'ils ne le sont pas, c'est là, au point de vue philosophique, une nouveauté éminemment troublante. C'est ici que le souvenir de Copernic s'impose à nous. Comme on croyait jadis qu'il existait une direction privilégiée dans l'espace, que les termes « en haut » et « en bas » ont une signification universelle, on croyait, avant Einstein, qu'il existe un sens et une vitesse constants pour l'écoulement du temps, que les mots « avant » et « après » ont une signification universelle. Nous savons aujourd'hui que, quand il n'y a point relation de cause à effet, ces mots expriment des idées relatives.

Quant à l'équivalence de la masse et de l'énergie, elle a ruiné la plus ancienne conception physique que les hommes aient imaginée, le dualisme *force* et *matière*. Les seules choses que nous puissions percevoir sont les mouvements et leurs variations. Pour les expliquer, on recourut à la fiction qui nous est naturelle et qui consiste à anthropomorphiser les choses. De même que nous pouvons déplacer un objet matériel, on admit que, quand un mouvement a lieu indépendamment de nous, il est produit par une cause extérieure, analogue à notre volonté servie par nos organes ; et l'on imagina donc que tout phénomène résulte de l'action réciproque de deux entités distinctes : une pondérable, la matière, essentiellement passive, et une impondérable, la force, ou cause de mouvement, qui serait aux corps matériels ce que les dieux étaient à l'Univers.

Sans doute, on avait reconnu depuis longtemps que ces entités sont inséparables, que l'on ne peut percevoir l'existence de l'une sans que l'autre se manifeste, ni même les concevoir isolées. Mais on admettait, comme un principe fondamental, qu'elles étaient irréductibles l'une à l'autre, et l'on tirait de là un inépuisable sujet de controverse, le pseudo-problème de l'action de l'immatériel sur le matériel : on voyait l'objet matériel, on posait l'existence de la force en article de foi, mais où étaient les organes par lesquels cette sorte de volonté avait prise sur les masses ?

Aujourd'hui, ce débat est clos. Ces deux prétendues entités peuvent se transformer l'une en l'autre, leur distinction n'existe pas. Dans les manifestations de la substance, c'est tantôt l'aspect « inertie » qui prédomine, et tantôt l'aspect « énergie », leur somme demeurant constante ; et, lorsque l'imperfection de nos sens fait que l'un des deux nous échappe, nous donnons à la substance le nom de celui que nous percevons : nous l'appelons *matière* ou *énergie*.

***

Ainsi, dans le domaine de la physique, la vieille hypothèse du dualisme a vécu : la théorie de la relativité a établi le monisme sur une base inébranlable.

Or, ce fait, déjà si important en lui-même, peut entraîner des conséquences qui le dépasseraient encore de beaucoup.

Depuis quelques décades, on multiplie les efforts tendant à élever la psychologie de son état primitif de description conjecturale au rang de science, c'est-à-dire à y remplacer la simple observation qualitative par l'expérimentation quantitative et les généralités imprécises et contestables par des lois aussi impératives que celles de la physique. On a déjà pu mesurer l'élévation de la température du crâne déterminée par le bruit d'une porte qui s'ouvre ou par l'audition d'un poème émouvant ; on a remarqué que la fatigue corporelle déterminée par le travail de l'esprit est un phénomène chimique, qui influe, notamment, sur la sécrétion des urines, et Le Dantec en a conclu « que la pensée correspond à un phénomène chimique et qu'il y a équivalence entre de la pensée et du travail » ; on a commencé à chercher quelle peut être cette équivalence, et l'on a cru pouvoir annoncer que, contrairement à l'opinion de bien des gens, le travail cérébral consomme deux fois plus d'énergie qu'un travail musculaire de même durée ; enfin, on mesure maintenant la variation de conductibilité électrique de notre corps sous l'influence de certaines émotions.

Ce ne sont encore là que des commencements, et nous sommes loin du jour où la psychologie pourra mériter le nom de « psychométrie », — à supposer qu'elle y parvienne jamais.

Mais, enfin, il semble bien qu'on soit en passe de réaliser, après un siècle et demi, l'audacieuse prédiction de Lavoisier : « Il serait possible de déterminer à combien de livres en poids répondent les efforts de l'homme qui récite un discours, d'un musicien qui joue d'un instrument, et on pourrait même *évaluer ce qu'il y a de mécanique dans le travail du philosophe qui réfléchit, de l'homme qui écrit, du musicien qui compose.* »

Cette thèse est celle que Le Dantec a résumée en une formule pénétrante : « *Il ne se passe rien de connaissable à l'homme, sans que se modifie quelque chose qui est susceptible de mesure.* »

Or, tant que l'on s'acheminait vers la détermination d'un équivalent énergétique de la pensée, mais que l'énergie restait un impondérable mystérieux auquel on ne faisait qu'ajouter un nouvel aspect, on pouvait sauvegarder le principe général du dualisme, de l'animisme : on isolait, sans confusion possible, d'une part la matière, brute ou organisée, comprenant le corps humain, et de l'autre l'énergie mécanique et l'âme humaine, qui « animent » les uns et les autres.

Mais voici que l'énergie ne se distingue plus de la matière pondérable. A quelles conséquences ne sera-t-on pas conduit, sinon sur le terrain de la métaphysique que nous nous sommes interdit d'aborder au cours de la présente étude, du moins sur celui de la psychologie? Je me borne à poser la question.

***

Il est dificile aux contemporains d'apprécier à sa juste valeur une œuvre qu'ils ont vue naître, et dont le développement et les conséquences peuvent démentir tous les pronostics. Celle d'Einstein apporte un si grand nombre de conclusions tellement surprenantes que quelques auteurs, dont la compétence et la bonne foi sont indiscutables, ont commencé par l'accueillir avec scepticisme.

Mais ils ont été fort peu nombreux, et le monde savant s'est bientôt trouvé d'accord pour juger que, dès l'âge de vingt-six ans, Einstein a mérité d'être inscrit parmi les plus grands novateurs dont les noms illustrent l'histoire de la science.

De là, un danger pour le grand public, qui peut être conduit à se former une opinion tout à fait erronée. La plupart des gens, en effet, entendant dire que les principes mêmes de la science viennent d'être modifiés, sont portés à en conclure que toutes les conditions de notre vie matérielle vont se trouver bouleversées. Or, il n'en est rien : cette grande révolution scientifique ne peut avoir, du moins actuellement, aucune influence sur les applications pratiques.

Mais alors, autre danger : celui de sous-estimer les découvertes d'Einstein, de les considérer comme de vaines subtilités, comme des amusements d'abstracteurs de quintessence. De la sorte, encore, on se tromperait grossièrement.

On n'a pu manquer de remarquer combien de fois sont revenus, au cours de cette étude, les mots « en première (ou en seconde) approximation ». Ils ont été appliqués à l'exactitude de toutes nos observations et, par conséquent, de toutes les lois qu'on peut en déduire, depuis les lois posées par les fondateurs de la mécanique jusqu'à la première loi d'Einstein, déjà dépassée par celle de la relativité généralisée, — en attendant que nous soient révélées des circonstances où celle-ci, à son tour, se trouvera insuffisamment approchée.

Mais ce mot d' « approximation » n'a pas le sens péjoratif qu'on peut être tenté de lui attribuer. Il indique au contraire que la loi considérée est adéquate aux conditions auxquelles on l'applique. Et l'on voit par là qu'aucune de ces lois n'annule la précédente. Elle la confirme, au contraire, puisqu'elle en délimite le champ ; elle la déborde, mais elle la contient en lui laissant toute sa valeur pour les cas moins étendus, que l'on considérait seuls auparavant.

Ainsi, il est bien entendu que la mécanique classique reste valable en première approximation ; et cette approximation est celle qui correspond à notre échelle et aux applications et mécanismes qui intéressent notre vie courante. Par contre, si l'on envisage des grandeurs d'un ordre supérieur : vitesses comparables à celle de la lumière, masses des grands corps célestes, mouvements prolongés pendant des centaines et des milliers de siècles, ces lois élémentaires doivent être remplacées par d'autres, plus précises, capables d'embrasser d'aussi vastes phénomènes. Mais qui oserait prétendre qu'il soit inutile d'avoir élargi à ce degré les vues qui nous sont ouvertes sur l'Univers? Et qui peut assurer, d'ailleurs, que de ces études théoriques il ne sortira pas quelque application bienfaisante? Suivant le mot de Condorcet, « le matelot qu'une exacte observation de la longitude préserve du naufrage doit la vie à une théorie conçue deux mille ans auparavant par des hommes de génie qui avaient en vue de simples spéculations mathématiques ». Et plus près de nous, combien jeune est encore la fée Électricité ! Qui eût prévu ses bienfaits, il y a un siècle, lorsque de purs théoriciens, comme Coulomb et Ampère, lui imposèrent des lois mathématiques ?

Que l'on n'établisse donc aucune opposition entre Galilée et Newton, d'une part, et Einstein de l'autre. Celui-ci a été le Galilée et le Newton des mouvements très rapides ou très prolongés. Il a continué, développé, perfectionné l'œuvre de ses devanciers. Sa gloire s'ajoute à la leur sans en rien retrancher.

APPENDICE

LES CONFÉRENCES D'EINSTEIN A PARIS

Le bon à tirer de ce livre était donné, quand l'annonce de l'arrivée d'Einstein vint atténuer le regret exprimé à la fin du premier paragraphe. Si donc Paris n'a pas été, parmi les capitales des pays alliés, la première à fêter le grand savant, contentons-nous de ce que le retard n'ait été que de quelques mois.

Cette « Semaine Einstein » a été, pour les privilégiés admis à la suivre, la plus belle des jouissances intellectuelles : un regard jeté sur la limite actuelle de notre connaissance de l'Univers, sous la direction de l'homme de génie qui vient de renouveler les fondements mêmes de cette connaissance !

Ce fut une semaine très chargée : du 31 mars au 8 avril, quatre séances de physique mathématique au Collège de France et une à la Société de Physique, une de cosmologie à la Société Astronomique, une de généralités à la Société de Philosophie, et, pour finir, une réunion intime chez Jean Becquerel, où, en guise de distraction et de repos, le maître fut encore pressuré de questions !

Tout ce qu'il est possible de faire ici, c'est de donner une vue d'ensemble de ces débats. Leur objet, très délicat, ne peut être exposé en détail que dans des ouvrages destinés aux spécialistes. Même là, d'ailleurs, on ne pourra pas présenter les choses dans leur suite historique. Les diverses interventions qui se sont produites n'avaient pas été classées, canalisées, si l'on peut dire : survenant dans l'ordre d'inscription de leurs auteurs, elles n'avaient aucun lien entre elles : un procès-verbal qui les reproduirait telles quelles, donnerait une fâcheuse impression de décousu.

Enfin, il faut bien le dire, beaucoup des questions posées manquaient d'intérêt, et témoignaient, chez leurs auteurs, d'une préparation ou d'une réflexion insuffisante. C'est ainsi qu'un savant insista beaucoup sur une objection qu'un calcul facile suffisait à lever, et s'attira de Langevin cette observation amicale : « Il faut toujours écrire les équations; il faut faire attention ». A un autre, venu de fort loin pour développer une longue suite de considérations peu cohérentes, Einstein se contenta de répondre en souriant : « Je dois dire.... je n'ai compris... rien du tout » !

***

Il faut souligner avant tout l'impression d'ensemble que Langevin a mise en lumière dans son magistral exposé à la Société de Philosophie : la théorie de la relativité est un tout logique et cohérent, et ne saurait donc mener à aucune contradiction. Aussi arrive-t-on sûrement, quand on examine les choses avec tout le soin voulu, à reconnaître que les objections soulevées reposent sur des paralogismes, c'est-à-dire sur des raisonnements logiquement déduits d'une hypothèse erronée, ou concluant faussement à partir d'une hypothèse exacte.

La discussion de semblables erreurs n'est d'ailleurs pas nécessairement stérile. Au contraire, elle peut avoir la grande utilité de mettre en plein jour certains écueils, souvent très dissimulés, contre lesquels nos vieilles habitudes nous exposent à nous heurter, lorsque nous cherchons à nous adapter à des idées aussi nouvelles.

Quelques mots suffisaient généralement à Einstein pour faire ressortir nettement la cause d'erreur inhérente à chaque cas. On peut en relever trois principales.

En premier lieu, il arrive souvent que l'on applique la théorie de la relativité restreinte à l'étude d'un problème qui implique l'intervention d'une accélération ou d'un champ de gravitation ; or, en pareil cas, et si passagère que soit cette intervention, il est indispensable de recourir à la relativité généralisée. Cette confusion fut commise même par Painlevé, qui finit d'ailleurs par reconnaître de bonne grâce qu'il s'était trompé. Il considérait une montre portée par un système défilant en ligne droite et à vitesse constante devant une montre immobile, puis revenant sur ses pas dans les mêmes conditions; cette montre, disait-il, une fois de retour devant la montre-témoin, révèlerait par son retard le mouvement absolu de son système. L'erreur de raisonnement était du même genre que celle que j'avais relevée antérieurement dans un ouvrage de Lecornu; celui-ci faisait décrire un cercle par la montre voyageuse, qui subissait donc une accélération continue, au lieu de l'accélération unique qui correspond, dans l'exemple de Painlevé, au changement de sens de la vitesse.

D'autres se placent dans des conditions qui leur semblent conformes à ce qu'on appelle le sens commun, mais qui sont physiquement irréalisables. L'erreur la plus fréquente, dans cet ordre d'idées, est celle qui consiste à parler d'un temps qui serait commun à deux systèmes en état de mouvement relatif, hypothèse qui n'est plus admissible aujourd'hui. Tel fut le cas d'Edouard Guillaume, de Genève.

Enfin, la théorie, dans son plein développement, exige l'emploi d'un appareil mathématique très complexe. Suivant la spirituelle observation d'Hadamard : « C'est ici qu'on voit que les mathématiques servent à quelque chose ». Or les mathématiciens qui ne sont pas en même temps physiciens se laissent facilement aller à accorder la même importance aux nombreuses variables dont ils ont à faire usage ; mais pour le physicien, une distinction s'impose. C'est là un point sur lequel Einstein a dû insister à plusieurs reprises, en termes qui furent pour beaucoup une leçon heureuse.

Ces variables, en effet, sont de deux sortes. Les unes sont des grandeurs mesurables physiquement, et que l'expérience peut donc atteindre ; c'est elles seules que le physicien veut trouver dans les formules qu'il aura à vérifier. Les autres sont de simples symboles mathématiques, dépourvus de signification physique ; elles doivent disparaître de ces formules. En présence de deux formules que le mathématicien pur juge équivalentes, le physicien en acceptera donc une, parce qu'il voit ce qu'elle contient et qu'il peut la vérifier, et rejettera l'autre.

* * *

Si la semaine Einstein n'avait été consacrée qu'à en finir avec diverses objections plus ou moins spécieuses, elle aurait déjà été très utile. Mais elle a fourni, en outre, l'occasion d'émettre plusieurs suggestions qui peuvent être fécondes.

Il faut signaler en première ligne la méthode nouvelle par laquelle Langevin parvient à établir la théorie de la relativité sans passer par l'intermédiaire de l'électro-magnétisme.

Ainsi que l'a dit Einstein, c'est là « un très grand progrès ». Non seulement une semblable méthode, plus directe, satisfait mieux l'esprit ; mais elle a l'avantage de fournir une garantie contre les objections que l'on peut encore faire à l'électro-magnétisme : la Mécanique relativiste ne risque plus d'être mise en danger par les modifications que pourront subir les formules de cette dernière science.

Incidemment, à propos d'une question posée par Carvallo sur l'expérience de Michelson, nous avons appris qu'Einstein prépare deux expériences inédites, pour compléter celle-ci au point de vue chronométrique.

Hadamard a mis en évidence une singularité mathématique que présentent les équations de la gravitation si l'on admet certaines conditions de rayon et de masse d'un astre, et demanda si Einstein pensait que cette singularité eût une signification physique.

« Sans aucun doute, répondit Einstein, c'est là une question très profonde, à laquelle personne encore ne peut répondre, et qui peut mettre sur la voie d'une loi naturelle importante. A priori, on ne voit pas pourquoi il serait impossible à la Nature de réaliser des astres de masse et de rayon tels, que, comme les formules le montrent, il en résulterait des catastrophes inadmissibles. Faut-il voir là l'origine du rayonnement des astres, qui seraient obligés d'abandonner ainsi leur excédent de masse ? L'avenir le dira. » Ce qu'Einstein appelait « la catastrophe Hadamard » ouvre donc un vaste horizon à l'hypothèse.

Cartan a signalé un nouvel « invariant » qu'il a découvert, et qu'il achève d'étudier. Il appartient aux physiciens de nous dire si cette création mathématique correspond à une réalité physique. Peut-être seront-ils mis par là sur la voie de quelque découverte ; ce ne serait pas la première fois que la pure analyse aurait suscité un progrès de la physique.

Enfin, Th. de Donder, de Bruxelles, a exposé l'état actuel d'un des problèmes les plus embarrassants et les plus gros de conséquences qui soient : la physique de l'électron. Personne n'a encore pu en édifier une théorie satisfaisante, et Einstein même se déclare peu content de la sienne : il semble que la piste nouvelle suivie par Donder puisse mener à quelque chose.

***

La séance donnée à la Société de Philosophie a dû décevoir quelque peu la plupart des habitués des discussions ordinaires de cette association. Elle fut surtout occupée, en effet, par les mathématiciens, que plus d'un auditeur était imparfaitement préparé à suivre ; et pourtant, l'intervention de cette cohorte redoutée était justifiée, et même indispensable, puisqu'il s'agissait d'examiner la relativité dans toute son extension. Or, si la connaissance de la relativité restreinte est quelque peu répandue, il n'en est pas de même de la relativité généralisée, qui exige un solide fondement mathématique et ne semble guère susceptible de vulgarisation. Bergson lui-même a dû déclarer modestement qu'il ne l'avait qu'imparfaitement pénétrée. Il s'empressa d'ailleurs d'ajouter qu' « il admire le caractère génial de la théorie de la relativité » ; que celle-ci « a purgé l'expérimentation d'une foule d'idées préconçues qui s'interposaient entre l'observateur et les phénomènes » ; enfin, qu' « elle constitue un puissant effort pour attaquer plus directement le fond des choses ».

Mais aussitôt cet hommage rendu, on put constater une fois de plus que la physique et la métaphysique, c'est-à-dire les sphères d'Einstein et de Bergson, sont complètement étrangères l'une à l'autre. Comme on pouvait le prévoir, en particulier, la relativité n'oppose aucune objection ni n'apporte aucune confirmation au concept bergsonien du temps.

Sans doute, ainsi que disait Einstein, l'origine de l'idée de temps est l'idée subjective (disons, si l'on veut, l'idée bergsonienne) de la simultanéité, que nous appliquons à tout ce qui nous entoure. Mais, en l'extériorisant ainsi, nous arrivons, de proche en proche, aux contradictions que nous révèle la relativité. Celle-ci nous enseigne les conditions dans lesquelles nous pouvons mesurer le temps et l'espace en donnant satisfaction au physicien : et nous sommes ainsi menés au temps local d'Einstein, qui n'a rien de commun avec le temps psychologique de Bergson.

Au sujet de la question du temps, il faut noter un cas très intéressant de renversement physiologique de l'ordre de succession des faits, observé par Pierron. On savait déjà qu'entre l'instant où un phénomène se manifeste à nous en excitant un de nos sens, et celui où nous percevons la sensation, il s'écoule un temps d'autant plus long que l'excitation était plus faible. Or donc, il peut arriver que le retard d'une excitation très faible soit tel, que nous en percevions avant elle une autre, beaucoup plus violente, et qui s'était produite postérieurement.

Mais revenons à l'incompatibilité de la physique avec la métaphysique. Elle a encore été mise en relief, précisément par l'honneur que Bergson a voulu faire à la relativité, en la présentant comme un puissant effort pour attaquer plus directement le fond des choses. Les relativistes ne manqueront pas de décliner ce compliment, ou du moins, ils ne l'accepteront qu à corection, car ils ont, avant tout, le culte de la précision. Or donc, ce n'est pas vers le « fond des choses » que se porte leur effort, mais simplement vers les rapports fondamentaux qui existent entre les choses, quel que soit le fond de celles-ci ; et l'on conviendra que c'est déjà un assez beau résultat que de se rapprocher de la connaissance de ces rapports.

Au reste, que peut-il y avoir de commun entre un effort qui exige l'emploi du plus puissant instrument mathématique dont on dispose actuellement, et celui qui prétend atteindre l'essence même des choses sans aucune opération intellectuelle consciente, par l'effet miraculeux de l'intuition ? L'esprit, assure-t-on, souffle où il veut. L'esprit, oui ; mais non la science, qui ne féconde que les terrains préalablement ameublis et préparés. Et c'est de science qu'Einstein s'occupe. Aussi disait-il tout tranquillement : « La bonne philosophie doit être d'accord avec les sciences naturelles..... Le temps des philosophes doit être celui des physiciens ». Autrement dit, il n'y a d'autre philosophie que la synthèse des sciences, comme le voulait Auguste Comte.

La vérité est donc que physiciens et métaphysiciens ne s'accordent ni ne discordent. Ils ne parlent pas des mêmes choses. Les mots *espace*, *temps*, *matière*, *énergie*, etc., représentent pour eux des idées toutes différentes. C'est peine perdue que de les réunir pour discuter.

Au reste, que messieurs les philosophes commencent par se mettre d'accord entre eux, comme font toujours les hommes de science. Un d'eux ayant invoqué l'autorité de Kant, qu'on ne s'attendait pas à rencontrer en cette affaire, Einstein lui répondit, avec le sourire et la finesse spirituelle qui font de lui le plus séduisant des interlocuteurs : « Oh, monsieur, chaque philosophe a son Kant particulier ! »

NOTE DE LA DEUXIÈME ÉDITION

Sur l'emploi des signaux lumineux pour définir la simultanéité.

L'exposé donné aux paragraphes 13 et 14 s'est trouvé un peu trop concis pour plusieurs lecteurs, et il convient donc de revenir sur ces points capitaux.

Certains croient en effet que, pour signaler à un observateur deux événements survenant à distance, on peut, dans tous les cas, employer des agents quelconques, si lents soient-ils, pourvu que leur vitesse de propagation soit connue. D'autres sentent bien que, dans le cas qui nous occupe, il faut que les signaux cheminent très rapidement; mais ils croient suffisant que leur vitesse soit la plus grande de celles que nous connaissons. Dans cette hypothèse, le choix à faire serait encore assez arbitraire; par exemple, si les hommes étaient aveugles, ils pourraient ne connaître aucune vitesse supérieure à celle du son et s'en tenir à elle pour définir la simultanéité.

Cette idée a même été émise par des savants réputés. Ainsi, Daniel Berthelot écrivait récemment, dans un opuscule qui prête à Einstein une métaphysique assez imprévue :

« A lire Einstein, on croirait que les hommes ne communiquent entre eux que par des signaux lumineux.

« Qui nous empêche de raisonner de même pour les autres sens ? Un auditeur qui s'éloigne d'un concert à raison de 340 mètres par seconde entend indéfiniment la même note...

« Ainsi, nous pouvons métaphysiquement imaginer autant de mesures de temps que nous avons de sens. Il y aurait un temps pour le musicien, un autre pour le peintre. »

Assurément, on peut employer un agent quelconque, de vitesse connue, tant que l'on s'adresse à un observateur immobile par rapport aux deux signaux qui cheminent en sens inverses, comme dans le cas de la figure 3. Mais il n'en est pas de même aussitôt que le mouvement d'un observateur entre en ligne de compte, c'est-à-dire en matière de relativité.

Supposons, par exemple, qu'on envoie deux signaux acoustiques, voyageant à la vitesse de 340 mètres par seconde et soient (fig. 4) deux systèmes à l'état de mouvement relatif, leur vitesse relative étant supposée égale au dixième de la précédente, soit à 34 mètres par seconde. Les sons émis en A et B auront bien, tous deux, pour l'observateur immobile M, la vitesse de 340 mètres; mais, pour l'observateur V, non solidaire des sources, leurs vitesses sont respectivement de 374 et 306 mètres par seconde.

Dans ces conditions, prenons les deux longueurs AM et BM égales à 340 mètres, et supposons qu'à l'instant de l'émission, l'observateur mobile soit, non en V, à hauteur de M, mais à 34 mètres de là vers la gauche, à 306 mètres seulement de A. Au bout d'une seconde, chaque observateur percevra simultanément les deux détonations, et ils seront en face l'un de l'autre, le système mobile ayant cheminé de 34 mètres vers la droite.

On voit par là que, si l'on emploie un agent de signalisation dont la vitesse peut être modifiée par l'état de mouvement des systèmes en présence, la relativité de la simultanéité n'apparaît point. Elle est au contraire mise en évidence par l'emploi des signaux lumineux. Et ce qui impose le choix de ceux-ci pour définir la simultanéité, c'est bien, comme il est dit aux pages 42 et 140, que leur vitesse est la même dans toutes les directions; c'est-à-dire c'est la loi de Michelson. Connaissant le nombre qui mesure cette vitesse, soit 300 millions de mètres par seconde, nous pouvons bien effectuer l'opération arithmétique qui consiste à y ajouter ou en retrancher 34 unités; mais, physiquement, la vitesse de la lumière reste, pour les deux observateurs, de 300 millions de mètres.

***

On remarquera que la vitesse de la lumière joue, par rapport à toutes les autres, un rôle qui ressemble à celui de l'infini par rapport à un nombre quelconque. L'infini, plus ou moins ce qu'on voudra, c'est toujours l'infini. De même, la vitesse de la lumière, plus ou moins celle de sa source, reste toujours égale à elle-même (bien entendu, dans la limite de nos moyens d'observation). Cela revient à dire que la lumière se propage, soit exactement avec la plus grande vitesse réalisable dans la nature, soit, tout au moins, à une vitesse assez voisine de cette limite. On sait, en effet, qu'au voisinage d'une limite, les variations de la fonction sont très faibles en comparaison de celle de la variable : à mesure qu'un mobile approche du maximum de vitesse, il faut donc lui appliquer une force additionnelle de plus en plus grande pour lui imprimer une accélération de plus en plus faible.

Mais, d'autre part, nous ne pouvons prétendre tout connaître; et nous devons donc nous attendre à mesurer un jour des vitesses supérieures à celle de la lumière (d'autant plus que la loi de Michelson n'a été établie qu'à l'aide d'une vitesse relative de 60 kilomètres par seconde, soit un cinq-millième de la vitesse de la lumière, et un sixième de l'incertitude qui subsiste sur la valeur de celle-ci). Tel pourra être le cas de la vitesse de propagation, encore inconnue, de la gravitation; mais, ainsi qu'il est dit à la page 142, la valeur attribuée à celle-ci par Laplace paraît être notablement exagérée.

Quoi qu'il en soit, on peut donc dire que le rôle éminent attribué à la lumière, dans l'établissement de la théorie de la relativité, était imposé par ce fait que l'expérience de Michelson nous oblige à attribuer pratiquement à la vitesse-limite la valeur de 300 000 kilomètres par seconde. Et c'est pourquoi il est permis de s'étonner de voir présenter cette évaluation comme un résultat de la théorie dont elle constitue, au contraire, une des bases expérimentales (voir au § 38).

TABLE DES MATIÈRES

ERRATUM

A la page 61, ligne 10, au lieu de : *accélération*, lire : *vitesse.*

Paris. — Imp. Larousse, 17, rue Montparnasse.

EXTRAIT DU CATALOGUE DE LA LIBRAIRIE LAROUSSE

13-17, rue Montparnasse, Paris (6e)

Ajouter 10 % au prix des ouvrages pour le port et l'emballage (pour les grands ouvrages vendus à terme, les frais sont strictement décomptés et ajoutés au montant de la facture).

Dictionnaires Larousse

encyclopédiques et illustrés

Les *Dictionnaires Larousse* sont aujourd'hui universellement connus. Partout on s'accorde à les considérer comme les meilleurs des dictionnaires et, peut-on dire, comme les types mêmes du genre. A l'heure actuelle où les conditions de la vie nous obligent plus que jamais à avoir en toutes choses des idées précises et des renseignements exacts, ce sont des ouvrages qui ont leur place marquée dans tous les foyers. Il existe des éditions de tous prix, dont l'ensemble constitue une série unique au monde. Enrichissant sans relâche cette incomparable collection, la Librairie Larousse a entrepris, à côté des *dictionnaires encyclopédiques généraux*, la publication de *dictionnaires spéciaux*, en vue de répondre à tous les besoins de l'existence présente.

DICTIONNAIRES ENCYCLOPÉDIQUES GÉNÉRAUX

publiés sous la direction de Claude AUGÉ

Nouveau Larousse illustré, en *huit volumes.* Le plus remarquablement documenté et illustré des grands dictionnaires encyclopédiques rédigé par plus de 400 collaborateurs d'élite. 7 600 pages (format 32 × 26) 237 000 articles, 49 000 gravures, 504 cartes en noir et en couleurs, 89 planches en couleurs. Broché, **525 fr.**; relié demi-chagrin . . . . . . **725** francs
Payable à raison de 50 francs par mois (au comptant, 10 % d'escompte).

N. B. — *Le* Nouveau Larousse *est tenu indéfiniment à jour par le* Larousse mensuel *(quatre volumes en vente [années 1907-1919]; le Tome V [1920-1922] paraîtra en janvier 1923). — Voir plus loin.*

Souscription globale au Nouveau Larousse *en* huit *volumes et au* Larousse mensuel *en* cinq *volumes, soit treize volumes, reliure demi-chagrin* . . . . **1 100** *francs*
Payable à raison de 65 francs par mois (au comptant, 10 % d'escompte).

EN VENTE CHEZ TOUS LES LIBRAIRES

DICTIONNAIRES ENCYCLOPÉDIQUES GÉNÉRAUX *(suite)*

Larousse Universel, *en deux volumes (en cours de publication).* Le dictionnaire d'après-guerre : le seul ouvrage qui présente, après les profondes transformations de ces dernières années, une documentation entièrement à jour sur toutes les connaissances humaines.

Paraît par fascicules hebdomadaires à 1 franc. L'ouvrage formera deux magnifiques volumes de plus de 1 200 pages chacun (format 21 × 30,5), contenant 120 000 articles, 25 000 gravures, 500 planches et cartes en noir et en couleurs; le *Tome Ier* (A-K) est en vente (broché, **72 fr.**; relié, **95 fr.**), le *Tome II* sera terminé au printemps 1923. *(Demander les conditions de souscription à l'ouvrage complet.)*

Petit Larousse illustré. Le plus complet des dictionnaires manuels. *Un volume* de 1 664 pages (format 13,5 × 20), 5 800 gravures, 130 tableaux et 120 cartes en noir et en couleurs. Relié toile . . . . **20 francs**
Edition de luxe sur papier bible. Relié toile, **32 fr.**; relié peau. **40 francs**

Larousse classique illustré. *Un volume* de 1 100 pages (13,5 × 20), 4 150 gravures, 70 tableaux et 114 cartes en noir et en couleurs. Cartonné, **15 fr.**; relié toile . . . . **17 fr. 50**

Larousse élémentaire illustré. *Un volume* de 1 275 pages (format 10,5 × 16,5), 2 500 gravures, 37 tableaux dont 2 en couleurs, 24 cartes. Cartonné, **12 fr.**; relié toile . . . . **13 fr. 50**

Dictionnaire illustré de la langue française. *Un volume* de 956 pages (format 10,5 × 16,5), 1 900 gravures, 37 tableaux dont 2 en couleurs. Cartonné, **9 fr.**; relié toile . . . . **10 fr. 50**

Larousse de poche. *Un volume* de 1 292 pages sur papier bible (format 10,5 × 16,5). Relié toile, **18 fr.**; relié peau. . . . . **24 francs**

DICTIONNAIRES ENCYCLOPÉDIQUES SPÉCIAUX

Larousse agricole illustré, *en deux volumes,* publié sous la direction de E. CHANCRIN, Inspecteur général de l'Agriculture, et R. DUMONT, Professeur d'Agriculture. L'ouvrage le plus pratique et le plus largement conçu qui ait jamais été fait dans ce genre : contient tout ce qui concerne l'agriculture, l'horticulture, l'élevage, etc., et s'adresse à toutes les personnes qui, à quelque titre que ce soit, s'intéressent aux choses agricoles. 1 700 pages (format 32 × 26), 5 000 gravures, 40 planches en couleurs. Broché, **190 fr.**; relié demi-chagrin . . . . **225 francs**

Payable 15 francs par mois (au comptant, 10 %).

Larousse médical illustré, publié sous la direction du Dr GALTIER-BOISSIÈRE. Le seul ouvrage vraiment pratique et sérieux qui ait été publié à l'usage du grand public en matière de médecine et d'hygiène, dû à la collaboration de spécialistes autorisés et merveilleusement illustré, en grande partie par la photographie d'après nature. Magnifique volume in-4° de 1 300 pages (20 × 27), 2 462 gravures, 78 planches en noir, 36 planches en couleurs. Broché, **62 fr.**; relié demi-chagrin . . **90 francs**

Payable 7 fr. 50 par mois (au comptant, 5 %).

Prospectus détaillés sur demande.

Larousse mensuel illustré

Périodique encyclopédique

publié sous la direction de Claude AUGÉ.

Le Larousse de l'actualité : enregistre chaque mois dans l'ordre *alphabétique,* sous une forme documentaire, toutes les manifestations de la vie contemporaine; tient au courant de tout, forme la *mise à jour* indéfinie du *Nouveau Larousse illustré* (voir plus haut). Paraît le premier samedi du mois. Le numéro illustré de nombreuses grav. (format 32 × 26). **2 fr. 50**

Abonnement pour 1922 : France et Colonies . . . . **26 francs**

— — Etranger (Union postale). . . . . **30 francs**

(Un numéro spécimen est envoyé au prix réduit de 1 fr. 50.)

En vente : **Tome I (1907-1910).** Br., **55** fr.; relié demi-ch. . **80 francs**

Tome II (1911-1913). Br., **65** fr.; relié demi-ch. **90 francs**

Tome III (1914-1916). Br., **75** fr.; relié demi-ch. **100 francs**

Tome IV (1917-1919). Br., **80** fr.; relié demi-ch. . **105 francs**

Payable par mensualités de 7 fr. 50 par 100 fr. (remise au comptant).

Le **Tome V (1920-1922)** paraîtra en janvier 1923.

Le Larousse mensuel *est le complément indispensable du* Nouveau Larousse *(voir plus haut les conditions de la souscription globale aux deux publications).*

Dictionnaires divers

Dictionnaire synoptique d'étymologie française, par Henri STAPPERS, donnant la dérivation des mots usuels, classés sous leur racine commune et en divers groupes : latin, grec, langues germaniques, etc. Un volume in-12 de 960 pages. Relié toile. . . . . **18 francs.**

Dictionnaire méthodique et pratique des rimes françaises, par Ph. MARTINON, bien au courant de la langue de notre temps et précédé d'un excellent traité de versification. Un vol. petit in-12 de 300 pages. Cart. **4 fr. 50**

Annuaire général

de la France et de l'étranger

Recueil de documentation générale sans analogue en France, constituant une véritable encyclopédie de la vie active des peuples; tous les renseignements utiles au point de vue politique, économique, etc., sur toutes les nations du globe. *Edition 1922.* XXXII-1 118 pages bourrées de faits, de chiffres et de statistiques. Un vol. in-8°, br., **30** fr.; relié toile. **35 francs**

Une splendide collection de grands ouvrages illustrés

COLLECTION IN-4° LAROUSSE

Les ouvrages dont se compose la *Collection in-4° Larousse* sont tout à la fois de grandes œuvres de fonds, d'un large intérêt et d'un caractère très vivant, et de splendides volumes pour lesquels on a fait appel à toutes les ressources matérielles de l'art moderne du livre. Imprimés avec soin sur un papier magnifique, dans un grand format (32 × 26 centimètres), merveilleusement illustrés par les procédés de gravure photographique les plus perfectionnés et enrichis de nombreuses planches et cartes en noir et en couleurs, ils sont revêtus de reliures originales signées d'artistes comme GRASSET, AURIOL, GIRALDON, etc.

Les ouvrages de cette collection peuvent être payés par mensualités de 7 fr. 50 par 100 francs de commande (au comptant, 5 % jusqu'à 175 francs, 10 % au-dessus).

SCIENCES NATURELLES

Histoire Naturelle illustrée, en *deux volumes :* I. *Les Plantes,* par J. COSTANTIN, Membre de l'Institut, et F. FAIDEAU. — II. *Les Animaux,* par L. JOUBIN, Membre de l'Institut, et Aug. ROBIN, Correspondant du Muséum *(en cours de publication)*. Une présentation moderne, vivante et pittoresque, des sciences si passionnantes de la nature. Paraît par fascicules hebdomadaires à **1** fr. **95**. *(Demander le prospectus spécimen donnant les conditions de souscription).*

La Terre, Géologie pittoresque, par Aug. ROBIN, correspondant du Muséum. 760 gravures photogr., 24 hors-texte, 53 tableaux de fossiles, 158 dessins et 3 cartes en coul. Br., **42** fr.; relié demi-chagr. . **67** francs

La Mer, par CLERC-RAMPAL. Original ouvrage d'ensemble sur la mer : océanographie, histoire du navire et de la navigation. 636 gravures photographiques, 16 hors-texte, 4 planches en couleurs, 6 cartes en couleurs, 316 cartes en noir ou dessins. Broché, **45** fr. ; relié demi-chagr. **70** francs

GÉOGRAPHIE PITTORESQUE

La France, Géographie illustrée, *en deux volumes,* par P. JOUSSET. La géographie de notre pays, y compris l'Alsace et la Lorraine, présentée de la façon la plus originale et la plus attrayante : un texte vivant et coloré, une merveilleuse évocation par la photographie d'après nature. 1984 gravures photographiques, 49 planches hors texte, 21 cartes et plans en noir, 32 cartes en couleurs. Br., **100** fr. ; relié demi-chagrin. **150** francs

Paris-Atlas, par F. BOURNON. Le plus bel ouvrage publié sur Paris et ses environs. 595 gravures photographiques, 32 dessins, 24 plans en huit couleurs. Broché, **30** fr. ; relié demi-chagrin . . . . **55** francs

Littérature

Chefs-d'œuvre des grands écrivains

BIBLIOTHÈQUE LAROUSSE

Tout le monde devrait posséder les grandes œuvres qui sont le patrimoine de l'esprit humain. La *Bibliothèque Larousse* les met à la portée de tous en des volumes d'un beau format et d'une présentation originale et attrayante. Leur typographie nette et élégante, leur intéressante illustration (fac-similés de gravures des éditions originales, portraits, autographes, etc.), les notices et annotations sobres et documentées qui accompagnent les textes sans les surcharger, donnent à ces éditions une place à part entre toutes les collections de ce genre. Ajoutons qu'elles rendent accessibles à tous un certain nombre d'ouvrages que leur étendue ne permet généralement pas de lire intégralement : les larges extraits qu'elles en donnent sont reliés entre eux par des notices analytiques ; on peut suivre ainsi la pensée de l'auteur et avoir une idée de l'ensemble.

XVIe siècle

Ronsard : Œuvres choisies illustrées . . . . 1 vol.
Rabelais : Gargantua et Pantagruel . . . . 3 vol.

XVIIe siècle

Corneille : Théâtre choisi illustré . . . . 3 vol.
Racine : Théâtre complet illustré . . . . 3 vol.
Molière : Théâtre complet illustré . . . . 8 vol.
Chefs-d'œuvre comiques des successeurs de Molière . 2 vol.
La Fontaine : Fables illustrées . . . . 2 vol.
Boileau : Œuvres poétiques illustrées . . . . 1 vol.
Bossuet : Œuvres choisies illustrées . . . . 2 vol.
La Bruyère : Les Caractères . . . . 2 vol.
La Rochefoucauld : Maximes . . . . 1 vol.
Mme de Sévigné : Lettres choisies illustrées . . . . 2 vol.

XVIIIe siècle

Regnard : Théâtre choisi illustré . . . . 2 vol.
Abbé Prévost : Manon Lescaut . . . . 1 vol.
J.-J. Rousseau : Les Confessions (extraits suivis) . . . . . . 1 vol.
— **Emile** (extraits suivis) . . . . 1 vol.
Voltaire : Romans . . . . 3 vol.
— **Théâtre choisi illustré** . . . . 1 vol.
— **Œuvre poétique** . . . . 1 vol.
— **Histoire de Charles XII** . . . . 1 vol.
Diderot : Œuvres choisies illustrées . . . . 3 vol.
Montesquieu : Lettres persanes . . . . 1 vol.
Bernardin de Saint-Pierre : Paul et Virginie . . . . 1 vol.

Littérature

Études, histoire littéraire, etc.

La Littérature française aux XIXe et XXe siècles, par Ch. Le Goffic, avec un appendice sur les *Ecrivains morts pour la patrie*, par Aug. Dupouy. Tableau d'ensemble précis et complet du mouvement littéraire en France depuis le début du XIXe siècle, accompagné de *pages-types*. *Deux volumes* illustrés de 76 gravures, sous couverture rempliée, tranches rognées. Chaque volume. . . . . 6 fr. 50

Anthologie des écrivains morts pour la Patrie, par Carlos Larronde, avec préface de Maurice Barrès. Les plus belles pages de Péguy, Psichari, etc. Quatre brochures in-18. Chaque brochure. 1 fr. 25

L'Ame de la France dans ses poètes, par P. Verrier. 1 franc

Comment on prononce le français, par Ph. Martinon. Traité complet de prononciation. Un vol. in-12. Br., **6 fr. 50**; rel. toile. 9 francs

Littérature anglaise, par W. Thomas, agrégé de l'Université. Un volume illustré. Broché, **3 fr.**; relié toile souple . . . . 3 fr. 75

Littérature allemande, par W. Thomas. Un volume in-8° illustré. Broché . . . . 3 francs

Histoire de la Littérature russe, par L. Leger, membre de l'Institut. Un volume in-8° illustré. Broché, **2 fr.**; relié toile souple . . 2 fr. 75

Fleurs latines, par P. Larousse. Explication des citations tirées de Virgile, Horace, Cicéron, etc. Un vol. gr. in-8°. Br., **18 fr.**; relié. 30 francs

Beaux-Arts

Anthologie d'Art français : XIXe siècle (Peinture), par Ch. Saunier. *Deux volumes* in-8°, contenant 240 reproductions photographiques en pleine page. Chaque vol., broché, **7 fr. 50**; relié toile. 10 francs

Anthologie d'Art français : XXe siècle (Peinture), par Ch. Saunier. *Un volume* in-8°, contenant 128 reproductions photographiques en pleine page. Broché, **7 fr. 50**; relié toile . . . . 10 francs

Le Musée d'Art (voir plus haut : *Collection in-4° Larousse*).

Les Arts français. Collection publiée de 1917 à 1919 et présentant une documentation originale sur les arts appliqués en France à notre époque. Un vol. in-8° (18,5×26,5), illustré de nombreuses gravures et de hors-texte en noir et en couleurs, reliure genre Bradel . . . . . . 45 francs

Rembrandt, par A. Bréal. Vie de Rembrandt et étude de son œuvre. Un vol. in-8°, illustré de 24 hors-texte. Br., **2 fr.**; relié t. 2 fr. 75

Puvis de Chavannes, par Léon Riotor. Sa vie, son œuvre, ses conceptions esthétiques. Un volume gr. in-8°, illustré de 32 hors-texte. 4 fr. 50

Histoire et Géographie

Histoire de France illustrée (v. plus haut : *Collection in-4o Larousse*).

Histoire de France contemporaine (v. pl. haut : *Coll. in-4o Larousse*).

La France héroïque et ses Alliés (v. plus haut : *Coll. in-4o Larousse*).

L'Histoire de la France expliquée au Musée de Cluny, par Edmond HARAUCOURT, directeur du Musée de Cluny. Guide par salles et par séries, avec commentaires. Un volume in-8o, illustré de nombreuses reproductions photographiques hors texte. Broché. . . . . 7 francs

Georges Clemenceau, sa vie, son œuvre, par Gustave GEFFROY, de l'Académie Goncourt, avec des pages choisies, annotées par L. LUMET. Biographie de Clemenceau, extraits de ses écrits et de ses discours, opinions et jugements dont il a été l'objet. Un vol. in-4o (22×28), illustré de nombreuses gravures en noir et en couleurs. Broché. . . . 20 francs
Relié demi-peau . . . . 30 francs

(Payable 7 fr. 50 par mois; au comptant, 5 %)

La Marine française pendant la Grande Guerre, par G. CLERC-RAMPAL. Très intéressant historique du rôle trop peu connu de notre marine pendant la Grande Guerre. Un vol. in-8o, 90 grav. et 1 carte. Br. 7 fr. 50

La Grande Mêlée des Peuples, récits héroïques de la Grande Guerre, par M. HOLLEBECQUE. Un volume in-8o, illustré de 4 hors-texte. Broché, 3 fr.; relié toile . . . . 6 fr. 50

Histoire des Etats-Unis d'Amérique, par DAVID SAVILLE MUZZEY, traduction de A. de LAPRADELLE. Une histoire claire et documentée, des origines à l'élection du président Harding. Un volume in-8o de 744 pages, illustré de nombreuses gravures et cartes. Br., 25 fr.; relié. . 32 francs

Histoire de Russie, des origines au commencement du XXe siècle, par L. LEGER, membre de l'Institut. Un volume in-8o, illustré de 12 gravures et 2 cartes. Broché, 1 fr. 50; relié toile . . . . 2 fr. 25

Atlas départemental Larousse, livre de références extrêmement documenté sur notre pays, donnant pour chaque département une carte de grandes dimensions, avec un texte très détaillé accompagné de nombreuses et fines gravures. Magnifique volume in-folio (33×45), 190 pages de texte, 100 cartes en six couleurs, 10 cartes en noir, 850 gravures photographiques. Relié toile amateur, titre or . . . . 55 francs

(Payable 7 fr. 50 par mois; au comptant, 5 %)

Géographie rapide de la France, par Onésime RECLUS. Un volume in-8o illustré. Broché, 2 fr.; relié toile. . . . . 2 fr. 75

La France, Géographie illustrée (v. plus haut : *Coll. in-4o Larousse*).

L'Allemagne contemporaine, La Belgique illustrée, L'Espagne et le Portugal illustrés, La Hollande illustrée, Le Japon illustré, La Suisse illustrée (voir plus haut : *Collection in-4o Larousse*).

Sciences

○ ○ ○

La Science française. Ouvrage publié avec la collaboration de Bergson, Durkheim, Lapie, Appell, Baillaud, Bouty, de Margerie, Maspero, etc. Introduction de Lucien Poincaré, directeur de l'Enseignement supérieur. Exposé, dû à la plume des plus éminents savants français de notre temps, de la part essentielle que la France a apportée au progrès scientifique. *Deux volumes* illustrés de nombreux portraits hors texte. Chaque volume, broché, **12** fr.; relié toile.......... **18 francs**

Qu'est-ce que la Science? par Le Dantec. D'intéressants aperçus sur la science, dus à un savant qui fut un des esprits les plus originaux de notre temps. Un volume in-8°, illustré de 88 grav. Broché.. **3 francs**

L'Œuvre de Félix Le Dantec, par J. Moreau. La méthode scientifique; les lois biologiques; les horizons philosophiques. Un volume in-8°, avec un hors-texte. Broché .... **4 francs**

Initiation aux théories d'Einstein, par Gaston Moch. Un volume in-8°, illustré de 10 gravures. Broché................ **4 francs**

Histoire Naturelle illustrée, par J. Costantin, L. Joubin, F. Faideau et Aug. Robin (voir plus haut : *Collection in-4° Larousse*).

La Terre, géologie pittoresque, par Aug. Robin (v. plus haut : *Collection in-4° Larousse*).

La Terre, tableaux de géologie, par Aug. Robin. Deux tableaux synoptiques en couleurs, avec illustrations (I. *Les Formations sédimentaires*. — II. *Géologie de la région parisienne*). Chaque tableau, en feuille format colombier (63×80) .... **2 fr. 50**

La Mer, par Clerc-Rampal (v. plus haut : *Collection in-4° Larousse*).

Herbier classique, par F. Faideau. 50 plantes caractéristiques des principales familles analysées et décrites. Un vol. in-8°, illustré de 162 grav. (reprod. photogr. et dessins d'après nature). Br., **3 fr. 50**; rel. toile. **6 fr. 50**

Topographie, par A. Berget, directeur-adjoint du Laboratoire de Géographie physique de la Sorbonne. Traité complet de topographie, présenté sous une forme claire et accessible, tout en gardant toujours un caractère réellement scientifique. *(Grande médaille Janssen de la Société de Topographie de France.)* Un volume in-8°, 375 gravures. Br. **12 francs**

Le Miracle des Hommes: Helen Keller, par Gérard Harry. Curieux ouvrage scientifique et philosophique sur la célèbre sourde-muette-aveugle. *(Couronné par l'Académie française.)* Un vol. in-16. Br. **5 francs**

Méthode Montessori : Pédagogie scientifique. Traduction de M.-R. Cromwell, avec préface de P. Lapie, Dr de l'Enseign. primaire. *Deux volumes* gr. in-8°, illustrés de nombreux hors-texte : I. *La Maison des Enfants*, broché, **18** fr.; II. *Education élémentaire*, broché ... **32 francs**

La Voix professionnelle, par le Dr Pierre Bonnier, laryngologiste de la clinique médicale de l'Hôtel-Dieu. Leçons pratiques de physiologie appliquée aux carrières vocales. Un volume in-8°, illustré de 39 gravures. Broché, **3 fr.**; relié toile souple.................... **3 fr. 75**

Hygiène et Médecine pratique

Larousse Médical illustré (v. plus haut : *Dictionnaires Larousse*).

Dictionnaire illustré de Médecine usuelle, par le Dr GALTIER-BOISSIÈRE. Ouvrage moins développé que le *Larousse Médical*, contenant les notions essentielles en fait d'hygiène et de soins à donner aux malades. Un vol. in-8° de 576 pages, 849 gravures. Broché. . . . . **18 francs**
Relié toile . . . . **24 francs**

Hygiène nouvelle, par le Dr GALTIER-BOISSIÈRE. Tout ce qu'il est essentiel de savoir sur les maladies contagieuses, les vêtements, l'habitation, etc. Un volume in-8°, illustré de 396 gravures. Broché . . . . **8 fr. 50**

L'Estomac, hygiène, maladies, traitement, par le Dr M.-A. LEGRAND. Un volume illustré de 14 gravures. Broché . . . . **3 fr. 50**

L'Œil, hygiène, maladies, traitement, par le Dr VALUDE, médecin de la clinique nationale des Quinze-Vingts. Un volume illustré de 54 gravures. Broché, **3** fr. **50**; relié toile . . . . **4 fr. 25**

L'Oreille, hygiène, maladies, traitement, par le Dr M.-A. LEGRAND. Un volume illustré de 74 gravures. Broché . . . . **3 fr. 50**

Le Nez et la gorge, hygiène, maladies, traitement, par le Dr NEPVEU. Un volume illustré de 48 gravures. Broché, **3** fr. **50**; relié toile . **4 fr. 25**

La Bouche et les dents, hygiène, maladies, traitement, par le Dr ROSENTHAL. Un vol. illustré de 28 gravures. Broché . . . . **3 fr. 50**
Relié toile . . . . **4 fr. 25**

La Peau et la chevelure, hygiène, maladies, traitement, par le Dr M.-A. LEGRAND. Un volume illustré de 65 gravures. Broché . **3 fr. 50**

Les Nerfs et leur hygiène, par le Dr GUILLERMIN. Un volume broché, **3** fr. ; relié toile . . . . **3 fr. 75**

Les Maladies de poitrine, par le Dr GALTIER-BOISSIÈRE. Un volume illustré de 63 gravures. Broché, **3** fr. **50** ; relié toile . . . . **4 fr. 25**

Arthritisme et artério-sclérose, par le Dr LAUMONIER. Un volume broché, **3** fr. **50** ; relié toile . . . . **4 fr. 25**

Précis d'alimentation rationnelle, par le Dr PASCAULT. Un volume broché, **3** fr. **50** ; relié toile . . . . **4 fr. 25**

La Cuisine hygiénique, par Mme Cl. FAURE, avec introduction du Dr GUILLERMIN. Un volume broché . . . . **3 fr. 50**

Pour élever les nourrissons, par le Dr GALTIER-BOISSIÈRE. Un volume illustré de 62 gravures. Broché, **3** fr. **50**; relié toile . . . **4 fr. 25**

Pharmacie domestique, préparation et emploi des médicaments, par Paul HUBAULT, pharmacien diplômé de l'École supérieure de pharmacie de Paris. Un volume illustré de 80 gravures. Broché . . . **3 fr. 50**

Livres d'intérêt pratique

Mémento Larousse. Petite encyclopédie de la vie pratique, contenant en un seul volume, classées méthodiquement, toutes les connaissances d'utilité journalière : grammaire, histoire, géographie, arithmétique, sciences, comptabilité, droit usuel, hygiène, savoir-vivre, recettes et procédés, etc. (*Vingt ouvrages en un seul*). Beau volume de 730 pages (format 13,5 × 20), 900 gravures, 82 cartes dont 50 en coul. Cart. . . . 15 francs
Relié toile, titre or. . . . . 17 fr. 50

Le Livre de la Jeune fille, par M. DOLIDON, M. MUNIÉ, Dr ROSENTHAL, Gabrielle et Léon ROSENTHAL, Maria VÉRONE. Mémento des connaissances pratiques nécessaires à la femme : organisation de la maison, cuisine, soins à donner aux enfants, etc. Un vol. in-8° illustré, cart. artist. 7 fr. 50

La Cuisine et la Table modernes, guide de la maîtresse de maison, dû à la collaboration d'hommes du métier et donnant non seulement les recettes culinaires proprement dites, mais encore tout ce qu'une femme doit savoir sur le matériel de cuisine, le service de table, etc. Beau volume in-8° de 500 pages, 600 gravures. Br., 12 fr. 50 ; rel. toile. 18 francs

Coupe et confection, par Mme TAPHOUREAU-LAUNAY. Un volume in-8°, 311 grav. dont 160 modèles de patrons. Br., 5 fr. ; relié. . 8 francs

Le Dessin de l'artisan et de l'ouvrier, par E. CHEVRIER. Traité pratique de dessin industriel. Un vol. in-8° illustré. Br., 3 fr. ; rel. toile 3 fr. 75

Peinture usuelle à la maison. Tout ce qu'il est utile de savoir pour opérer soi-même : outillage, badigeons, etc. Brochure in-8° ill. 1 fr. 50

L'Electricité à la maison, par H. DE GRAFFIGNY. Indications pratiques pour procéder soi-même aux diverses applications de l'électricité, éclairage, sonneries, allumoirs, etc. Un vol. in-8° illustré. Broché. . 3 francs

Le Guide mondain, par la Ctesse DE MAGALLON. Art moderne du savoir-vivre. Un volume in-8°. Broché, 3 fr. ; relié toile. . . . . 3 fr. 75

La Chasse moderne, encyclopédie du chasseur, due à la collaboration de personnalités autorisées. Beau volume in-8° de 682 pages, illustré de 488 gravures. Broché, 18 fr. ; relié toile. . . . . 25 francs

Pour devenir bon chasseur, par P. GASTINNE-RENETTE et G. VOULQUIN. Conseils pratiques. Un volume in-8° illustré. Broché . . . . 4 fr. 50

La Pêche moderne, encyclopédie du pêcheur, due à la collaboration de spécialistes. Beau volume in-8° de 600 pages, illustré de 680 gravures. Broché, 14 fr. ; relié toile. . . . . 20 francs

La Comptabilité commerciale, industrielle et domestique, avec notions sur le commerce, le crédit, les sociétés et la législation commerciale, par G. SOREPH. Un volume in-8°. Broché, 7 fr. ; relié toile . . . 10 fr. 50

Champignons mortels et dangereux, par F. GUÉGUEN, professeur agrégé à l'Ecole supérieure de pharmacie. Un volume in-8°, illustré de 7 planches en couleurs. Relié toile souple . . . . 3 fr. 50

Agriculture

Larousse Agricole illustré, encyclopédie agricole en deux volumes (voir plus haut : *Dictionnaires Larousse*).

Almanach du Blé 1922, édité sous le patronage du *Comité national du Blé*. Conseils pratiques pour augmenter et améliorer la production du blé, 1 fr. (franco .... 1 fr. 25).

Les Ennemis des plantes cultivées *(Maladies — Insectes)*, par G. TRUFFAUT. Moyens de déterminer d'une façon simple et pratique, d'après l'observation des ravages causés, les ennemis et parasites des plantes ; remèdes à apporter dans les différents cas. Beau volume in-8°, illustré de nombreuses gravures et de 53 planches hors texte. Broché ... 12 francs

BIBLIOTHÈQUE RURALE

L'Agriculture moderne, encyclopédie de l'agriculteur, par V. SÉBASTIAN. 671 gravures........................ *(En réimpression)*.

Progrès en agriculture (conseils pratiques), par R. DUMONT. 92 gravures. Broché .... 4 francs

La Ferme moderne, traité des constructions rurales, par M. ABADIE. 390 gravures et plans. Broché........................ 7 fr. 50

Rotations et Assolements, par PARISOT. Br., 5 fr. ; rel. 8 francs

La Culture profonde, par R. DUMONT. 33 gravures. Broché. 4 francs
Relié toile.. 7 francs

Les Céréales *(Culture raisonnée)*, par R. DUMONT. 116 gravures, 1 planche hors texte. Broché .... 9 francs

Les Plantes sarclées *(Racines et tubercules)*, par R. DUMONT. 86 gravures, 2 planches hors texte. Broché .... 8 francs

Les Sols humides, par R. DUMONT. 52 gravures. Broché. 6 francs
Relié toile.. 9 francs

La Laiterie moderne, par WAUTERS et HAENTJENS. 75 gravures. Broché .... 4 fr. 50

La Médecine vétérinaire à la ferme, par le Dr MOUSSU. 85 gravures. Broché .... 7 fr. 50

Toute la Basse-Cour, par VOITELLIER. 50 grav. Broché.. 4 fr. 50

Elevage en grand de la volaille, par PALMER. 15 gravures. Broché.. 3 francs

L'Arboriculture fruitière en images, par VERCIER. 101 planches avec texte explicatif en regard. Broché.................. 7 fr. 50

Le Pommier à cidre et les meilleurs fruits de pressoir, par E. FAU. 30 gravures et 32 planches. Broché, 5 fr. ; relié toile. 8 francs

Ouvrages pour la jeunesse

Les Livres roses pour la jeunesse. Les lectures les plus attrayantes, les plus saines et les plus variées, pour les enfants de six à quinze ans : contes, légendes, récits de la vie moderne, etc., illustrées de nombreuses gravures dues au crayon de vrais artistes (depuis le nº 265, ces gravures sont tirées en couleurs). **Deux volumes par mois** (premier et troisième samedi). Le volume........................ 0 fr. 30

Abonnement pour 1922 : France, 9 fr.; étranger, 10 francs.

Demander la liste des volumes en vente.

L'Encyclopédie de la jeunesse (Qui? Pourquoi? Comment?). Une publication unique en France : tout le savoir humain mis à la portée des jeunes intelligences sous la forme la plus accessible, la plus nouvelle et la plus attrayante (*La Terre et son histoire; Tous les pays; Le livre de la Nature; Choses qu'il faut connaître; Pages à lire et à retenir;* etc.). **Six beaux volumes de 720 pages** (format 16×25), **illustrés chacun de 900 gravures et de superbes hors-texte. Chaque volume, relié toile amateur,** tête dorée.................................... 26 francs

Les six volumes pris ensemble.................... 150 francs

Payable 15 *francs par mois (au comptant, 5 %).*

La Science amusante, par Tom Tit. Cent expériences instructives et amusantes, exécutées avec les objets usuels que tout le monde a sous la main, bouchons, allumettes, fourchettes, épingles, etc. (*Médaille d'honneur de la Société d'Encouragement au bien*). Un volume in-8°, illustré de nombreuses gravures. Broché........................ 7 francs

Relié toile.................................... 12 francs

Deux cents Jouets qu'on fait soi-même avec des plantes, par V. Delosière. Indications pratiques pour faire une foule de jouets ingénieux avec les plantes les plus communes. Joli volume in-4°, illustré de 200 gravures et 4 planches en couleurs .... (*En réimpression*).

Dansez, chantez, par Chavannes et Rousseau. Chansons et danses mimées, avec accompagnements pour piano. Album in-4° illustré, tirage en deux tons. Broché............................ 5 fr. 50

Relié toile.................................... 8 francs

A la belle Image. Poésies illustrées pour le jeune âge. Album in-4° illustré. Cartonné.............................. 4 fr. 50

Trésor poétique, par Larousse et Boyer. **300 morceaux de poésie empruntés pour la plupart aux poètes du XIXe siècle.** Joli volume de près de 500 pages. Cartonné .... 6 fr. 90

OUVRAGES POUR LA JEUNESSE (suite)

La Geste héroïque des petits soldats de bois et de plomb, par George AURIOL. Un volume in-8°, illustré de 70 dessins d'André HELLÉ. Broché, 1 fr. 30; sur hollande . . . . 6 fr. 50

Rabelais pour la jeunesse. Les amusantes aventures de Gargantua et de Pantagruel, mises à la portée de la jeunesse. Texte adapté par Marie BUTTS. *Trois jolis volumes (Gargantua,* 1 vol.; *Pantagruel,* 2 vol.), avec illustrations en noir et en couleurs. Chaque volume, couverture en couleurs. . . . . 6 fr. 50

Contes héroïques de douce France : *Les Aventures de Huon de Bordeaux,* texte adapté par Marie BUTTS, 1 vol. ; — *Les Infortunes d'Ogier le Danois,* texte adapté par Marie BUTTS, 1 vol. ; — *Jeanne la Bonne Lorraine,* par J.-B. COISSAC, 1 vol. — Chaque volume, avec illustrations en noir et en couleurs, couverture en couleurs. . . . . 6 fr. 50

L'Art, simples entretiens à l'usage de la jeunesse, par PÉCAUT et BAUDE. Excellent ouvrage d'initiation artistique *(Couronné par l'Académie française).* Un volume in-8°, illustré de 140 gravures. Broché . . . . 10 francs
Cartonné, 12 fr. 50; relié toile. . . . . 15 francs

La Voix des Fleurs, par Clarisse JURANVILLE. Origine des emblèmes donnés aux plantes, souvenirs et légendes qui y sont attachés, etc. Un volume in-8°. Broché, 3 fr.; relié toile. . . . . 4 francs

La Nature en images, par F. FAIDEAU et Aug. ROBIN. *Trois volumes* illustrés d'un grand nombre de photographies et de planches en couleurs :
La Terre et l'Eau . . . . 10 francs
Les Plantes et les Fleurs. . . . . 10 francs
L'Homme et les Bêtes. . . . . 10 francs

Le Fils à Guignol, par Claude HINOT. Petites scènes avec chants pour théâtre Guignol et théâtre de salon. *Deux volumes* in-8°, illustrés de nombreuses gravures. Chaque volume, broché . . . . 4 fr. 50
Relié toile . . . . 8 fr. 50

Théâtre d'éducation. Nombreux choix de pièces pour les deux sexes et les différents âges. Chaque pièce en un acte, 0 fr. 75; en deux actes, 1 fr.; en trois actes . . . . 1 fr. 50
(Demander la liste détaillée.)

Pièces tirées des Contes de Perrault et des Fables de La Fontaine, par Eugène GRANGIÉ (E. DE SURGÈS) et Marie SOUDART. Sept charmantes brochures, illustrées de dessins originaux de F. FAU, pour enfants de 6 à 13 ans. Chaque brochure . . . . 0 fr. 75
(Demander la liste détaillée.)

Saynètes et scènes comiques, par Emile GOUGET, pour jeunes filles et pour jeunes gens. Chaque numéro. . . . . 0 fr. 75
Chaque série de dix numéros . . . . 6 fr. 50
(Demander la liste détaillée.)

Paris. — Imp. LAROUSSE, 17, rue Montparnasse. — 589-422.

Prix : 4 fr.