Zeitschrift: Studia philosophica : Schweizerische Zeitschrift für Philosophie = Revue suisse de philosophie = Rivista svizzera della filosofia = Swiss journal of philosophy

Herausgeber: Schweizerische Philosophische Gesellschaft

Band: 6 (1946)

Artikel: Réflexions sur la notion de Loi en Physique

Autor: Saini, Hugo

DOI: https://doi.org/10.5169/seals-883455

Nutzungsbedingungen

Die ETH-Bibliothek ist die Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften auf E-Periodica. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Zeitschriften und ist nicht verantwortlich für deren Inhalte. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern beziehungsweise den externen Rechteinhabern. Das Veröffentlichen von Bildern in Print- und Online-Publikationen sowie auf Social Media-Kanälen oder Webseiten ist nur mit vorheriger Genehmigung der Rechteinhaber erlaubt. Mehr erfahren

Conditions d'utilisation

L'ETH Library est le fournisseur des revues numérisées. Elle ne détient aucun droit d'auteur sur les revues et n'est pas responsable de leur contenu. En règle générale, les droits sont détenus par les éditeurs ou les détenteurs de droits externes. La reproduction d'images dans des publications imprimées ou en ligne ainsi que sur des canaux de médias sociaux ou des sites web n'est autorisée qu'avec l'accord préalable des détenteurs des droits. En savoir plus

Terms of use

The ETH Library is the provider of the digitised journals. It does not own any copyrights to the journals and is not responsible for their content. The rights usually lie with the publishers or the external rights holders. Publishing images in print and online publications, as well as on social media channels or websites, is only permitted with the prior consent of the rights holders. Find out more

Download PDF: 09.12.2025

ETH-Bibliothek Zürich, E-Periodica, https://www.e-periodica.ch

Réflexions sur la notion de Loi en Physique.

Par Hugo Saini.

C'est l'échelle d'observation qui crée le phénomène.
C.-E. Guye.
C'est encore l'échelle d'observation qui crée la loi.

1. *Introduction.*

Si, dans leurs traités de Physique destinés à l'enseignement, les physiciens sont généralement peu explicites sur le sens à donner au mot *loi*, certains d'entre eux n'ont pas hésité à consacrer une partie de leurs recherches philosophiques à l'examen de cette notion fondamentale.

Dans plusieurs de ses ouvrages et notamment dans ses « Dernières pensées », H. Poincaré [1] s'est demandé ce qu'est une loi. « C'est, dit-il, un lien constant entre l'antécédent et le conséquent, entre l'état actuel du monde et son état immédiatement postérieur. Connaissant l'état actuel de chaque partie de l'univers, le savant idéal, qui connaîtrait toutes les lois de la nature posséderait des règles fixes pour en déduire l'état que ces mêmes parties auront le lendemain. » Il ajoute plus loin : « Les lois que nous donne l'observation directe ne sont jamais que des résultantes. Prenons, par exemple, la loi de Mariotte. Pour la plupart des physiciens, ce n'est qu'une conséquence de la théorie cinétique des gaz... On arrive à démontrer que la densité d'un gaz est proportionnelle à sa pression. Les lois qui régissent les corps observables ne seraient donc que des conséquences des lois moléculaires. »

Sans vouloir allonger inutilement le nombre des citations, il est intéressant de mentionner Max Planck, pour qui « une loi physique est une proposition qui établit un lien permanent et impossible à rompre entre des grandeurs physiques mesurables,

[1] Henri Poincaré, Dernières Pensées, p. 7 et 23.

de telle sorte que l'on peut *calculer* une de ces grandeurs quand on a *mesuré* les autres »[2].

En comparant ces définitions, on constate que, lorsqu'ils se sont exprimés indépendamment de toute idée métaphysique non clairement formulée, les physiciens sont d'accord entre eux sur le sens à donner au mot loi.

Questionnons maintenant les philosophes et pour cela consultons d'abord ces remarquables instruments de travail que sont le Vocabulaire technique et critique de la philosophie d'André Lalande, et le Vocabulaire philosophique d'Edmond Goblot.

Pour E. Goblot « tout rapport constant est une loi ». « En mathématique, la *loi* d'une courbe est la relation constante qui permet de déterminer tous ses points. Une loi naturelle est une relation constante entre deux termes observables. »

« On distingue des lois *naturelles* et des lois *pratiques*. Tout rapport constant doit être *nécessaire*, car le contingent n'est pas constant ; toute loi exprime donc une nécessité. »[3]

Dans son Vocabulaire, A. Lalande dit : « Sens D. Loi. Formule générale (constatative, non impérative) telle qu'on puisse en déduire d'avance les faits d'un certain ordre, ou plus exactement ce que seraient ces faits s'ils se produisaient à l'état d'isolement : la loi de Mariotte ; la loi de la chute des corps ; la loi de Bode. Le mot, en ce sens, se dit exclusivement : 1° des lois de la nature suggérées et vérifiées par l'expérience et des lois de la vie mentale considérées comme analogues aux lois naturelles : la loi de l'habitude. 2° Des conditions imposées d'avance, arbitrairement, à une certaine transformation mathématique : une quantité assujettie à varier suivant telle loi. »

« Ce terme s'applique, par extension, à toute formule générale résumant certains faits naturels, même si elle ne constitue pas un énoncé formel, et ne permet pas de déduire des connaissances déterminées : les lois des passions, la loi du progrès. »[4]

Emile Boutroux, qui s'est demandé si les lois de la nature étaient contingentes ou nécessaires, donne encore la même définition, puisque pour ce philosophe, il y a loi lorsqu'on observe un

---

[2] Max Planck, Initiation à la Physique, Paris, Flammarion, p. 144.

[3] Edmond Goblot, Le Vocabulaire philosophique, 5e éd., Paris, A. Colin, p. 328.

[4] André Lalande, Vocabulaire technique et critique de la Philosophie.

ordre fixe entre les faits et que l'esprit remarque entre eux des liaisons constantes [5].

Les philosophes que je viens de citer sont donc d'accord avec les physiciens. Cependant si ces derniers insistent davantage sur l'aspect quantitatif qui est l'une des caractéristiques de la loi, les philosophes en donnent un énoncé plus général. Cet accord est-il cependant aussi harmonieux qu'on pourrait le croire ? Confrontons pour cela la pensée de Pierre Duhem et celle de James Jeans.

Duhem nous apprend [6] « D'ailleurs, la loi de Physique n'est que le résumé d'une infinité d'expériences qui ont été faites ou qui pourront être réalisées » (p. 217). Plus loin, p. 254, « Une loi de Physique est une relation symbolique dont l'application à la réalité concrète exige que l'on connaisse et que l'on accepte tout un ensemble de théories ». A la page 259, « Ainsi, toute loi physique est une loi approchée ; par conséquent, pour le strict logicien, elle ne peut être ni vraie ni fausse ».

A la page 432, il précise encore mieux sa pensée. « Pour nous, le principe [7] de la conservation de l'énergie n'est en aucune manière une affirmation certaine et générale concernant des objets réellement existants. C'est une formule mathématique que pose un libre décret de notre entendement, afin que cette formule, combinée avec d'autres formules postulées d'une manière analogue, nous permette de déduire une série de conséquences, et que ces conséquences nous fournissent une représentation satisfaisante des lois constatées dans nos laboratoires. Ni cette formule de la conservation de l'énergie, ni les formules que nous lui associons ne peuvent, à proprement parler, être dites vraies ou fausses, puisqu'elles ne sont point des jugements portant sur des réalités. »

Un quart de siècle passe, riche en découvertes inattendues tant théoriques qu'expérimentales : mécanique ondulatoire, radio-

---

[5] Emile Boutroux, De la contingence des lois de la nature, Paris, Alcan, 1921, Introduction.

[6] Pierre Duhem, La Théorie physique, 2e éd., 1914, Paris, Rivière, chap. IV et V.

[7] Dans ce passage, Duhem emploie indifféremment les mots *principe* ou *loi*. En effet, quelques lignes plus bas, il dit : « La *loi* de la conservation de l'énergie est-elle ou non compatible... »

activité artificielle, physique nucléaire, et sir James Jeans constate que « la science du XXe siècle, projetant sur la nature des idées purement mathématiques, s'aperçoit qu'elles lui conviennent aussi parfaitement et aussi exclusivement que le soulier au pied de Cendrillon. Ceci étant, on peut suggérer que la réalité tient du domaine intellectuel. En d'autres termes, que l'idéalisme a toujours soutenu que l'entrée de la route qu'on emprunte pour découvrir la nature est intellectuelle et qu'il y a par conséquent bien des chances pour que son extrémité le soit également ».

« La science d'aujourd'hui ajoute qu'au point où elle en est arrivée, presque tout — pour ne pas dire tout — ce qui n'était pas intellectuel a disparu. Rien de neuf ne s'y est substitué qui n'appartienne au domaine de l'esprit. Mais qui pourra dire ce qui nous attend au prochain tournant ? »[8]

On trouve chez le philosophe genevois, Adrien Naville, dans son bel ouvrage sur la « Classification des Sciences » une conception très nuancée de la loi. « Une loi est une dépendance conditionnellement nécessaire entre deux termes. » — « De la loi, qui est un rapport objectif, il faut distinguer l'énoncé du rapport, la formule. Très souvent, trop souvent, on les confond ; de là, nous le verrons, des erreurs graves. J'appelle *théorèmes* les propositions par lesquelles nous essayons de formuler les lois. »[9]

L'essentiel, pour ce philosophe, est de ne pas perdre de vue la différence entre la loi, rapport objectif, et l'énoncé que nous en formulons : le théorème. « Les événements *réels*, dit-il (page 32), se produisent *exactement* selon les *lois*, mais ils ne se produisent pas exactement selon nos théorèmes. Pourquoi ? Parce que nos théorèmes sont insuffisants. Ils sont trop simples pour embrasser la complexité des rapports réels, des événements concrets. »

Je reviendrai sur quelques-unes de ces citations.

Remarquons pour terminer que ce sont surtout des philosophes ou des physiciens théoriciens qui ont examiné, dans leurs travaux consacrés à la philosophie des sciences, la notion de loi. Par contre les réflexions qu'on va lire expriment non pas le

---

[8] James Jeans, Les nouvelles bases philosophiques de la science, Paris, Hermann, 1935, p. 302.

[9] Adrien Naville, Classification des sciences, 3e éd., Paris, Alcan, 1920, p. 22.

point de vue d'un *théoricien* mais celui d'un *expérimentateur*. En ce sens elles offriront, peut-être, un certain intérêt.

2. *Les premières expériences.*

C'est une vérité bien connue que déjà avant Galilée, les hommes avaient observé les phénomènes naturels et réfléchi sur leurs causes. Et l'on a maintes fois fait remarquer que les idées de l'illustre Florentin n'étaient pas sans relations avec celles de ses prédécesseurs. Cependant si je mentionne ici en premier lieu Galilée, c'est qu'il est un des premiers qui ait réalisé des expériences, *en vue de connaître une loi* ; c'est aussi que j'entends distinguer nettement l'activité de la pensée scientifique et l'acquisition d'une certaine technique.

Il est entendu que déjà les primitifs et les hommes des cavernes avaient acquis des techniques et de l'*expérience* au sens où l'entend Claude Bernard. « Dans la langue française, dit-il, le mot expérience au singulier signifie, d'une manière générale et abstraite, l'instruction acquise par l'usage de la vie. Quand on applique à un médecin le mot « expérience » pris au singulier, il exprime l'instruction qu'il a acquise par l'exercice de la médecine. Il en est de même pour les autres professions, et c'est dans ce sens que l'on dit qu'un homme a acquis de l'*expérience*, qu'il a de l'*expérience*. Ensuite on a donné par extension et dans un sens concret le mot d'*expériences* aux faits qui nous fournissent cette instruction expérimentale des choses. »[10]

Je pense qu'on peut étendre cette définition à tout être humain et même dans certains cas à l'animal.

Il est donc acquis que nos lointains ancêtres avaient de l'expérience, des tours de main, savaient fabriquer des objets à l'aide d'outils rudimentaires, du feu même. Ils avaient déjà une connaissance empirique et qualitative de certaines lois, par exemple de celles qui se rapportent à la fusion des métaux et qui leur permettaient d'effectuer des alliages. Sur la naissance de cette technique, Abel Rey dans son article d'ensemble figurant aux premières pages de la nouvelle «Encyclopédie fran-

[10] Claude Bernard, Introduction à l'étude de la médecine expérimentale, 1re partie, chap. 1, 11.

çaise », s'exprime ainsi : « Si le primitif semble imperméable à l'expérience dans toute sa vie alogique ou mystique, ici au contraire, il est éducable, et parfois avec une très grande finesse. Témoin toutes ces techniques, ces ruses de pêche ou de chasse, la fabrication de ces armes, de certains objets usuels, certains détails des ornements qu'il leur ajoute, etc., bref tout ce qui concerne sa vie pratique et ses besoins. »

« Toute la riche histoire des techniques nous montre un progrès incessant par corrections successives, ce qui ne veut pas dire unilinéaire sans retours et sans chemins de traverse. »

Il faut aussi se souvenir que dès les temps les plus reculés de la préhistoire, dès la période chelléenne, les hommes possèdent déjà les deux découvertes qui leur permettront de vivre et de se maintenir : le moyen de faire *le feu* et la connaissance d'une roche dont il est facile d'obtenir *des outils*, le silex.

Même si ces expériences et ces techniques millénaires ne ressortissent pas d'une pensée scientifique clairement perçue, elles constituent néanmoins un patrimoine, une somme de richesses et une réserve de faits bruts dans laquelle les générations ultérieures vinrent puiser à larges mains.

Tout près de nous, ne voyons-nous pas aussi l'enfant poser mille questions, expérimenter tout en jouant et, intuitivement tout au moins, acquérir déjà des rudiments de lois qualitatives. La psychologie génétique développée par Jean Piaget [11], nous a montré comment les notions fondamentales se construisent lentement dans un ordre bien déterminé ; en effet, le développement mental de l'enfant se fait par niveaux successifs, à chacun desquels correspond l'acquisition de notions particulières.

A trois ans et demi, un petit garçon pose déjà la question du plan incliné (« Papa, si je penche la table, mes plots, est-ce que ça va tomber ? ») ; il sait bien, en effet, que les objets vont glisser sur la table penchée. A quatre ans, il s'inquiète de ce qui vient « après » : après les murs de sa chambre, après le pré, le Jura, la mer, après le ciel, et cela dans les trois dimensions. A quatre ans et demi, il demande ce qu'il y a dans les corps, dans le pain, la farine, etc. Il demande encore comment on construit les montagnes, le ciel, la terre, l'air, les plantes.

[11] Jean Piaget, Le mécanisme du développement mental, Arch. de psychol., T. XXVIII, N° 112, 1941.

A l'aube des temps historiques, l'on trouve sur les bas-reliefs des monuments de l'ancienne Egypte et de l'Assyrie, la représentation d'outils et d'appareils mécaniques, les uns fort ingénieux, les autres rudimentaires. Ainsi bien longtemps avant que l'on ait pensé à une théorie au sens actuel de ce mot, l'on rencontre chez les premiers hommes, des machines, des connaissances mécaniques.

Et Henri Poincaré ne manque pas de nous rappeler que d'abord « c'est l'Astronomie qui nous a appris qu'il y a des lois. Les Chaldéens qui, les premiers ont regardé le ciel avec quelque attention, ont bien vu que cette multitude de points lumineux n'est pas une foule confuse errant à l'aventure, mais plutôt une armée disciplinée. Sans doute, les règles de cette discipline leur échappaient, mais le spectacle harmonieux de la nuit étoilée suffisait pour leur donner l'impression de la régularité, et c'était déjà beaucoup »[12].

Mais c'est chez les Grecs qu'une expérimentation rudimentaire ou affinée se développa parallèlement aux techniques primitives. Au VIe siècle av. J.-C., les Pythagoriciens se servent du monocorde avec chevalet mobile — l'ancêtre lointain du moderne sonomètre — pour déterminer les rapports constants (loi) des longueurs des cordes donnant des accords consonnants. C'est donc au sage de Crotone que l'on devrait pour la première fois l'énoncé d'une loi.

Anaxagore, qui naquit en 500 et fut contemporain d'Empédocle, cherche à établir la matérialité de l'air à l'aide d'outres gonflées et fermées. Il devançait ainsi mentalement de quelque dix siècles les expériences pneumatiques d'Otto de Guericke sur le vide, expériences qui eurent une portée décisive sur les rapports entre le *vide* et l'*espace*.

Dans sa collection de « Problèmes mécaniques », Aristote — nous dit Arnold Reymond[13] — laisse entrevoir les lois les plus importantes de la mécanique (principe des vitesses virtuelles, parallélogramme des forces, loi d'inertie). Mais son esprit plus enclin à la dialectique qu'à l'expérience l'empêche de découvrir les fondements réels de la mécanique. Il met néanmoins en évi-

[12] Henri Poincaré, La valeur de la science, p. 159.

[13] Arnold Reymond, Histoire des sciences exactes et naturelles dans l'antiquité greco-romaine, p. 62, 178 et suivantes.

dence les « aporia » que renferment certaines questions. En ce qui concerne le mouvement des corps, il formule la loi du déplacement d'un mobile dans un milieu résistant ; la force motrice est proportionnelle à la vitesse et à la masse du mobile. Or à l'échelle humaine et parmi les mobiles qui nous entourent, le mouvement le plus immédiat qu'on peut observer comprend en gros deux régimes : un régime de démarrage et un régime final à vitesse constante. Aristote a trouvé la loi approchée du régime final. Il appartiendra à Galilée de s'immortaliser par la découverte des lois infiniment plus fécondes du régime de démarrage.

Mais c'est à Archimède de Syracuse (287-212) que l'on doit l'énoncé systématique et déductif — à la manière des éléments d'Euclide — de propositions relatives à l'équilibre des solides et des liquides. Ces « propositions » sur les propriétés des corps flottants et immergés, sont résumées dans l'énoncé aujourd'hui bien connu sous le nom de « Principe ou loi d'Archimède ». De même ses propositions sur l'équilibre des leviers constituent encore de nos jours les « Lois du levier ». Si l'on tient donc à attribuer d'une manière certaine, la notion de loi, conçue comme un rapport constant, à un homme particulier, c'est bien à Archimède qu'il faut penser.

Parmi les expérimentateurs, il faudrait encore mentionner Héron, dont l'activité se situe entre 150 et 100 av. J.-C. et qui dirigeait à Alexandrie non pas une école de philosophie, mais bien un « polytechnicum » qui marque ici son entrée dans l'histoire. Ses expériences nombreuses sur la compression et l'échauffement de l'air, la vaporisation de l'eau, la presse à levier et à vis, font de lui le premier ingénieur. Il donne, en effet, une méthode pour la construction des tunnels et des puits. Il construit une machine à air chaud pour refouler l'eau et la première turbine à vapeur — l'éolipyle. Enfin il énonce presque toutes les lois de la statique.

Mais laissons au temps prodiguer ses possibilités et nous verrons, au IIe siècle après J.-C., Claude Ptolémée délaisser pour quelques heures ses épicycles et s'occuper de recherches méthodiques sur la réflexion et la réfraction de la lumière. Nous entrons même en possession, probablement pour la première fois dans l'histoire, d'un véritable compte rendu d'expériences. En

effet, l'astronome d'Alexandrie a résumé ses mesures sur la réfraction de la lumière de l'air dans l'eau en une table que je désire transcrire ici, car elle est pleine d'enseignement [14].

Expérience de Ptolémée sur la réfraction de la lumière de l'air dans l'eau.

Angle d'incidence	Angle de réfraction	Indice de réfraction
0°	0°	
10°	8°	1,25
20°	15° ½	1,28
30°	22° ½	1,30
40°	29°	1,32
50°	35°	1,34
60°	40° ½	1,33
70°	45°	1,33
80°	50°	1,29

Comme l'indice de réfraction de l'eau, au voisinage de 25° C., a pour valeur moyenne 1,332, on voit que les mesures de Ptolémée qui donnent une moyenne de 1,30, ne s'écartent de la valeur trouvée par les mesures modernes que de 2 % environ.

Ptolémée n'a cependant pas opéré en vue de rechercher une loi possible, mais d'une manière purement empirique. La notion de loi expérimentale, entrevue par Archimède, n'est pas encore devenue une des nécessités de la pensée scientifique.

Après Ptolémée, on perd la trace de préoccupations expérimentales, et il faut arriver au XIIIe siècle, en pleine scolastique, pour la retrouver chez certains des maîtres de l'Université d'Oxford. Nous voyons, en effet, l'un deux, Robert Grosseteste, évêque de Lincoln (1175-1253), affirmer la nécessité d'appliquer les mathématiques à l'étude des sciences de la nature. Et l'un de ses illustres élèves, Roger Bacon, le Doctor mirabilis, insistera dans son Opus Majus, sur la nécessité d'étudier la nature par l'observation et de la soumettre aux lois du calcul mathématique. Mais, nous apprend Etienne Gilson, « si Bacon tient de ses maîtres anglais le goût et le respect des mathématiques, c'est à un

[14] De la Méthode dans les Sciences, première série. Article de H. Bouasse, p. 128. Paris, Alcan, 1914.

Français, Pierre de Maricourt, qu'il doit le sentiment de la nécessité de l'expérience. Car pour Pierre de Maricourt, il ne suffit pas de savoir calculer et raisonner, mais il faut encore être adroit de ses mains, car avec l'habileté manuelle, on peut facilement corriger une erreur que l'on ne découvrirait pas par les seules ressources de la mathématique »[15].

Il n'est peut-être pas inutile de faire remarquer ici, que pour certains auteurs comme Emile Bréhier et Daniel Essertier, la notion de *scientia experimentalis* telle qu'on la trouve chez R. Bacon ne correspond pas à la conception que nous en avons aujourd'hui. En effet, « lorsque Bacon parle de la science expérimentale, il songe donc à une science secrète et traditionnelle, consistant dans l'investigation des forces occultes et dans la domination que leur connaissance assure à l'expert. L'univers de ces experts, c'est essentiellement l'univers tel que Plotin le décrivait, un ensemble de forces qui s'entrecroisent, fascination, paroles magiques, forces émanées des astres et auxquelles on est soumis sans le savoir.

Partant de là, Bacon attache bien moins d'importance au contrôle des faits qu'à la découverte de secrets ou de faits étonnants que les experts se transmettent d'une génération à l'autre »[16].

D'un point de vue analogue, Essertier remarque que « Bacon nous parle de la *scientia experimentalis* avec un enthousiasme qui nous révèle plus que tous les autres documents, cette soif de merveilleux ressentie par toute son époque : la sixième partie de l'Opus Majus n'est que la description des moyens propres à atteindre les chimères qu'on nourrissait de son temps. D'abord la *scientia experimentalis* n'est pas la source, le point de départ, mais bien le but de toute spéculation. Dès le début, elle tourne donc le dos à ce que les modernes entendront par le même mot. La condition essentielle du savoir n'est pas aperçue. C'est que ce n'est pas le « savoir » comme tel qui intéresse Bacon non plus que ses contemporains »[17].

Léonard de Vinci clôt cette série des premiers expérimenta-

---

[15] Etienne Gilson, La Philosophie au moyen-âge. Payot, Paris, 1925, p. 214.

[16] Emile Bréhier, Histoire de la philosophie, Tome 1, p. 697.

[17] Daniel Essertier, Les formes inférieures de l'explication, Alcan, Paris, 1927, p. 192.

teurs qui préparèrent la voie à Galilée. On doit à la main de ce peintre illustre, au savoir encyclopédique, non seulement des tableaux célèbres, mais encore de nombreux manuscrits — qui ne furent publiés qu'au XVIIIe siècle — relatant ses expériences et ses réflexions les plus profondes. Son insatiable curiosité lui a fait explorer tous les chapitres de la physique : statique des solides et des liquides, cinématique du plan incliné, où il devance Galilée en découvrant que la vitesse du mobile est proportionnelle au temps, capillarité, élasticité ; il énonce une des lois du frottement (force de frottement indépendante de la surface de contact). Il observe le jeu des vagues et des ondes à la surface de l'eau, leurs déplacements, leurs interférences. Il en conclut que la propagation du son et de la lumière doit être, elle aussi, de nature ondulatoire [18]. Cette intense activité expérimentale fait partie de sa méthode de pensée : il l'a résumée dans de nombreux aphorismes dont les deux suivants annoncent que le moment était venu d'entrer dans l'ère de l'expérimentation : *Les mathématiques sont le langage de la nature. Il me paraît que vaines et pleines d'erreurs sont les sciences qui ne naissent pas de l'expérience, mère de toute certitude, et qui n'aboutissent pas à une notion expérimentale, c'est-à-dire dont ni leur milieu, ni leur fin ne passent par aucun des cinq sens.*

On me pardonnera, je le souhaite, cette énumération jugée peut-être trop longue, sinon superflue, mais je tenais beaucoup à faire ressortir que le sens de l'expérience et de sa nécessité pour comprendre la nature, n'était pas apparue tout à coup, à la Renaissance, comme une mutation sur le plan de la pensée. C'est aussi parce que cette idée : que nos prédécesseurs et les Grecs surtout étaient imperméables à l'expérience, est fort répandue et maintes fois exprimée. En vérité, il est excessif de dire que la science antique a manqué de cela même que nous considérons aujourd'hui comme la condition du savoir : la connexion du mathématique et du physique, du calcul et de l'expérience. Des hommes, tels ceux dont j'ai rappelé les noms, d'Anaxagore à Ptolémée, de Bacon à Léonard de Vinci, en ont pressenti, sinon pleinement reconnu la nécessité, tandis que, dans les temps actuels — et c'est là peut-être la différence avec

---

[18] Edmond Hoppe, Histoire de la physique, Paris, Payot, 1928.

le passé — ce sont tous les hommes de science qui utilisent systématiquement cette méthode.

J'ai laissé de côté, dans ce raccourci, tout l'aspect psychologique, affectif et social de la question, bien que l'on sache aujourd'hui que ces facteurs ont pu entraver et même empêcher le développement de l'esprit scientifique. Les recherches récentes, effectuées par divers auteurs [19], ont montré que c'est chez les Grecs des siècles antérieurs à celui de l'apogée de cette civilisation, que les conditions sociales et familiales furent les plus favorables à l'avènement de ceux qui élevèrent la pensée humaine des formes inférieures aux formes supérieures de l'explication. Je pense tout particulièrement aux présocratiques : à Pythagore qui sépara le Nombre de la chose nombrée, à Parménide qui opposa à l'opinion sensible la voie des vérités rationnelles. Plus tard, Socrate, Platon et Aristote, en achevant l'élaboration du concept, furent, sans conteste, les premiers et les plus grands de ces artisans qui ont permis l'éclosion de la pensée rationnelle.

3. *Galilée et la loi du mouvement uniformément accéléré.*

C'est dans les « Discorsi e dimostrazioni matematiche intorno a due nuove scienze attenanti alla Mecanica e i movimenti locali » parus entre 1638 et 1655 que Galilée exposa les résultats de ses recherches sur la loi de la chute des corps [20]. On s'aperçoit vite, à leur lecture, que Galilée a déjà, dans toute sa plénitude, la manière de penser d'un physicien moderne. En premier lieu, il ne se demande pas *pourquoi* les corps tombent, mais bien *comment* ils tombent. « Il ne me paraît pas opportun, écrit-il, de rechercher pour le moment, quelle est la cause de l'accélération du mouvement naturel. » Ensuite, il pense qu'on a parfaitement le droit d'imaginer arbitrairement une loi du mouvement et d'en considérer les conséquences. Bien plus, il écrit : « Quand je vois une pierre tomber en partant du repos et acquérir ensuite de nouveaux degrés de vitesse, pourquoi ne croirais-je pas que ces accroissements suivent la loi la plus simple

[19] Daniel Essertier, op. cit., R. de Saussure, Le miracle grec.

[20] E. Jouguet, Lectures de mécanique, Gauthier-Villars, Paris, 1924, p. 90 et suivantes.

et la plus banale. » — « ... de même nous pouvons percevoir la simplicité dans les accroissements de vitesse par la même égalité des parties du temps, en concevant que le mouvement est accéléré uniformément et continuellement de la même manière quand, dans des temps égaux, il reçoit des accroissements égaux de vitesse. »

Il y a donc une loi et celle-ci doit être simple. Pour la déterminer, Galilée fait des hypothèses et ne retient que celle dont il peut démontrer qu'elle ne conduit pas à un résultat faux ou impossible. Ainsi, partant de l'hypothèse simple que la vitesse du mobile est proportionnelle au temps écoulé, il démontre que les espaces parcourus sont proportionnels au carré des temps.

Ayant énoncé, puis démontré mathématiquement la loi, il passe à la vérification expérimentale. C'est dans ce triple processus : énoncé, démonstration mathématique à partir d'une hypothèse ou dans le cadre d'une théorie, puis vérification expérimentale, que résident l'une des exigences du physicien moderne et la fécondité de la loi.

Mais il y a plus, Galilée a prévu et résolu, partiellement tout au moins, les difficultés inhérentes aux deux plans sur lesquels la pensée est obligée de se mouvoir et qui sont :

a) le plan des mathématiques pour la *démonstration* de la loi,

b) le plan du monde sensible pour la *vérification* expérimentale.

Sur le plan mathématique, c'est l'abîme insondable du continu, déjà entrevu dans les apories de Zénon d'Elée, et sur le plan du monde sensible, c'est la difficulté de mesures précises, difficultés résultant de l'imperfection du sujet et de son interaction avec l'objet.

Examinons ces deux ordres de difficultés et la solution qu'en a donnée Galilée.

a) Sagredo, l'un des interlocuteurs des Discorsi, fait, à propos de la proportionnalité entre la vitesse et le temps, l'objection suivante : « Le temps étant divisible à l'infini, il s'ensuit que, en diminuant toujours dans le même rapport la vitesse précédente, il n'y aura aucun degré de vitesse, si petit qu'il soit, c'est-à-dire aucune lenteur, si grande soit-elle, qui ne se soit trouvée dans le mobile depuis la lenteur infinie, c'est-à-dire depuis le repos. »

Et Simplicio, autre interlocuteur, d'ajouter : « Mais s'il y a

une infinité de degrés de lenteur de plus en plus grande, jamais ils ne seront épuisés complètement ; par conséquent, le mobile ascendant n'atteindra jamais le repos, mais il se mouvra indéfiniment en ralentissant sans cesse, chose qu'on ne voit pas se produire. »

Salviati : « Cela arriverait, si le mobile se tenait pendant quelque temps à chaque degré de vitesse ; mais il ne fait qu'y passer sans s'attarder plus d'un instant ; et, comme tout espace de temps, si petit qu'il soit, contient une infinité d'instants, il y en a assez pour correspondre à l'infinité des degrés de la vitesse décroissante. Que le grave ascendant ne conserve pas pendant un temps fini le même degré de vitesse, cela se voit comme suit : S'il y avait un espace de temps au premier et au dernier instant duquel la mobile se trouvât avoir le même degré de vitesse, il pourrait, avec ce second degré, être élevé de la même hauteur qu'il a franchie en passant du premier au second ; il passerait de même du second au troisième, et finalement, il continuerait son mouvement uniforme à l'infini. »

b) Galilée ne s'est pas borné à vérifier plus ou moins bien la proportionnalité entre les carrés des temps écoulés et les espaces parcourus. Mais avec son plan incliné, formé d'une planche de bois longue de douze coudées et surélevée d'une à deux coudées à l'une de ses extrémités, sur laquelle il faisait rouler une bille de bronze très dure, « On répétait, dit-il, le même essai de nombreuses fois pour bien s'assurer de la valeur de cette durée et, dans cette répétition, on n'a jamais trouvé de différences supérieures au dixième de pulsation. Cette opération faite et établie avec précision, nous fîmes descendre la même bille sur le quart seulement de la longueur du canal ; la durée de la chute mesurée se trouva toujours rigoureusement égale à la moitié de l'autre. »

« L'expérience ayant bien été répétée 100 fois, toujours les espaces parcourus se sont trouvés dans le rapport des carrés des temps et cela quelle que fût l'inclinaison du plan. »

Galilée a donc pris toutes les précautions matériellement possibles à son époque. La vérification de la loi a dû être faite avec une précision de quelques « pour cent », ainsi que j'ai pu m'en rendre compte en répétant ces mesures dans des conditions semblables, et cette précision fut heureusement jugée suffisante.

On peut reconnaître dans le mouvement général d'un mobile mû par un moteur ou dans celui d'un corps pesant tombant dans un milieu résistant, plusieurs régimes : un régime de démarrage (sensiblement uniformément accéléré) suivi d'un régime de transition, puis d'un régime final à vitesse constante.

Aristote n'a vu que le régime final à vitesse constante. C'est, en effet, ce dernier qu'une observation superficielle révèle le plus immédiatement, et c'est de ce mouvement que le philosophe grec a tenté de donner la loi. En revanche, le régime de démarrage, qui exige la notion de vitesse variable, conduisant ainsi à l'accélération, n'a été clairement conçu que par Galilée.

On pourrait, en entrant dans les détails, faire apparaître la fécondité et les conséquences grandioses qui n'étaient encore qu'en puissance dans la notion galiléenne d'accélération. Ce n'est qu'après l'invention, par Leibnitz et Newton, du calcul infinitésimal, après l'identification de l'accélération à la dérivée seconde de l'espace par rapport au temps, que l'on devait se rendre compte de toute la richesse qui se trouvait contenue dans cette nouvelle notion. En effet, connaissant la valeur de la force newtonienne appliquée au mobile (force = masse $\times$ accélération), on peut remonter de l'accélération à une trajectoire bien déterminée et unique sitôt que l'on s'est donné la position et la vitesse initiales du corps en mouvement.

C'est donc le déterminisme laplacien — et par suite la méthode de toute la physique classique — qui a trouvé son point de départ dans la notion d'accélération et dans son expression en langage mathématique.

Dès lors le germe vivace de la loi, et sa triple exigence : énoncé, démonstration, vérification expérimentale, est bien planté. Il l'est même dans un sol assez riche pour assurer son épanouissement futur.

4. *La valeur des expériences grossières.*

Lorsqu'il mesurait les positions successives de la planète Mars, Ptolémée appréciait les angles à dix minutes près, soit avec un peu plus de précision que pour ses mesures sur la réfraction.

Au XVIe siècle, Jean Kepler disposait donc ainsi, pour établir l'orbite de Mars, des anciennes mesures de Ptolémée et de celles,

toute récentes, de Tycho-Brahé. En comparant les trajectoires fournies par les observations de Ptolémée d'une part à celles, beaucoup plus complètes et minutieuses de Tycho-Brahé, Kepler trouva des écarts certains de 8 minutes. Or Kepler savait que l'illustre astronome danois avait apprécié la minute ; il fut alors amené à renoncer à l'orbite circulaire et à essayer l'ellipse, dont les géomètres grecs avaient déjà déterminé les propriétés ; puis en généralisant, il put énoncer les trois lois auxquelles son nom est définitivement attaché.

Ainsi, grâce à des mesures plus précises, se traduisant par le gain d'une puissance de 10, ce qui permettait d'augmenter d'un chiffre significatif le nombre qui mesure la grandeur envisagée, Kepler fit passer l'astronomie de la première à la seconde approximation. En effet, dit-il, « Ces huit minutes qu'il ne m'est plus permis de négliger, m'ont mis sur la voie pour réformer toute l'astronomie »[21].

Cependant, si une plus grande précision est nécessaire pour passer d'une approximation à la suivante, ou pour discriminer deux formules en présence, il se peut, dans le cas de la découverte d'une loi nouvelle en un domaine non encore exploré, qu'une mesure grossière soit plus indiquée et conduise à une meilleure vérification de la loi à établir. J'aimerais le montrer et pour cela reprendre la discussion de la vérification expérimentale de la loi du mouvement uniformément accéléré de Galilée.

Remarquons d'abord que la loi à vérifier peut se traduire par une courbe dessinée dans un système de coordonnées appropriées. Ici, la loi de Galilée — vitesse proportionnelle au temps — est représentée par une droite dans le diagramme *vitesse-temps*. Or supposons que la loi véritable, si elle existe, ne soit pas la droite de Galilée, mais bien un arc de courbe admettant la droite comme tangente, et supposons en outre que, dans les limites des conditions de mesure, l'écart maximum entre la droite et la courbe atteigne un pour cent. Si Galilée avait disposé de moyens lui permettant de mesurer le temps et la vitesse à un pour mille par exemple, il aurait constaté que ses mesures ne vérifiaient pas sa loi linéaire simple. Il aurait vu les points ex-

---

[21] F. Boquet, Histoire de l'astronomie, Paris, Payot, 1925, p. 321. F. Tisserand et H. Andoyer, Leçons de cosmographie, p. 245.

périmentaux, portés sur le diagramme, s'écarter de plus en plus de la droite théorique et se disposer sur la courbe, avec des écarts inférieurs à ceux qui séparaient les deux lignes. Il aurait dû alors abandonner l'hypothèse de la loi simple et, peut-être, renoncer même à en chercher une autre.

En outre, le physicien de Florence ne disposait pas de chronomètre pour mesurer le temps. Il imagina alors de déterminer cette grandeur en mesurant de petites masses d'eau, qu'il laissait s'écouler d'un large récipient muni d'un petit orifice. Il admit que les masses de liquide recueilli étaient proportionnelles au temps, ce qui n'est pas exact, puisque le niveau du liquide dans le récipient varie au cours de l'expérience. Si donc il avait mesuré ces masses avec une très grande précision, il aurait trouvé une loi plus compliquée que celle qu'il avait prévue théoriquement. Mais Galilée a su éliminer cette difficulté en choisissant précisément un récipient très large tel que l'écoulement de la petite masse se fît sensiblement à niveau constant.

On trouve dans cette technique expérimentale le germe d'une méthode féconde, méthode qui consiste à diminuer ou à éliminer du problème à résoudre les grandeurs inconnues ou difficilement accessibles ou encore, sur le plan théorique, celles qui n'ont pas de signification.

On trouve un exemple de ce fait dans l'élaboration de la théorie élémentaire de l'atome d'hydrogène tel que Bohr la fit connaître en 1913. Dans ses calculs, pour retrouver la loi des séries de raies établies par le physicien bâlois Balmer, Bohr devait introduire — en plus de la constante de Planck, la charge et la masse de l'électron — la fréquence de rotation de l'électron et le rayon de son orbite autour du noyau. Or ces dernières grandeurs n'ont pas de signification physique. Par une intuition de génie, Bohr les élimine de ses calculs et aboutit à une formule finale qui ne renferme que les fréquences réellement observées en fonction des nombres quantiques et d'autres grandeurs mesurables.

La supposition que Galilée aurait pu disposer d'appareils très sensibles a très peu de chances d'être fondée. La construction d'instruments perfectionnés et très sensibles n'est, en effet, possible que lorsqu'on est déjà en possession de lois. *Il y a ainsi, heureusement, dans la nature des choses, dans les trois condi-*

tions : homme encore naïf, phénomène naturel à connaître et état rudimentaire de la technique, une imbrication qui rend la découverte possible. C'est une chance que l'homme ait découvert, parmi les milliers de cas complexes possibles, des cas, des phénomènes, des substances relativement simples, qu'il ait pu débrouiller. Ce fut un bonheur pour Galilée, que ni le frottement du plan, ni la résistance de l'air, ni la rotation de la bille, ni la rotation de la terre, ni les masses entourant le dispositif expérimental n'aient joué un rôle mesurable pour lui. Et ce fut une chance aussi pour lui que ces différents facteurs aient été, à l'approximation de ses mesures, des grandeurs qu'on ne pouvait alors observer. (Le mathématicien aurait dit des infiniment petits d'ordre supérieur.) Ce sont là des circonstances heureuses, qu'à la grossièreté de la théorie aient correspondu des moyens de mesures également grossiers, empêchant ainsi de voir la loi réelle, qui est différente. On pourrait étendre sans peine ces remarques à toutes les premières découvertes.

En chimie par exemple, si parmi les quelque 500 000 substances que l'homme pouvait découvrir, toutes avaient eu des molécules renfermant des centaines ou des milliers d'atomes, aucune loi n'aurait été découverte puisqu'en effet les premières analyses étaient encore si grossières que la précision n'atteignait que 10 pour cent environ. Aussi de telles mesures n'auraient pas permis de voir l'entrée ou la sortie d'un atome sur 1000, c'est-à-dire de distinguer la molécule d'une substance de celle d'une autre espèce. C'est donc aussi une chance qu'il se soit trouvé des substances telles que l'eau, les sels et les acides usuels qui, elles, ne renferment que peu d'atomes dans leurs molécules.

Et c'est probablement pour n'avoir pas pu et pas su saisir des substances ou envisager des phénomènes simples, que les Grecs ne les ont pas, en partie tout au moins, eux-mêmes découverts.

Ainsi, dans la courbe qui symbolise le développement des sciences, des connaissances et du progrès — courbe qui n'est pas un cercle — on assiste après le premier tour à la naissance d'un second tour. D'autres hommes, dont les pensées et l'activité s'orientent vers les applications, mettent à profit les lois découvertes, construisent des appareils plus perfectionnés et affinent les techniques. Celles-ci permettront à leur tour, si la

théorie est, elle aussi, entrée dans la seconde approximation, de faire des mesures plus précises et des expériences plus riches de conséquences.

Tout s'enchaîne donc et la science physique progresse selon le schéma que voici :

Acquisitions expérimentales de l'enfant et technique rudimentaire des premiers hommes → théories et expériences grossières → technique perfectionnée → expériences et théories plus évoluées → technique et outillage de précision, pour aboutir aux expériences et aux théories raffinées actuelles.

Il suffit, pour illustrer ce cycle, de penser à l'extrême perfectionnement des théories modernes et aux grandioses techniques expérimentales contemporaines : la chambre automatique de Wilson qui prend des milliers de photographies par jour, les compteurs combinés de Geiger qui décèlent les gerbes de rayons cosmiques, les cyclotrons dont les effets sont équivalents à ceux de quelques kilogrammes de radium, l'utilisation de l'énergie nucléaire.

5. *Le rôle décisif de la précision des mesures.*

Qu'on me permette de rappeler ici que mesurer une quantité, c'est la comparer à une quantité de même nature prise pour unité. Cela suppose la connaissance de ce qu'il faut entendre par égalité et par addition de deux grandeurs. Parmi toutes les grandeurs envisagées en physique : longueur, volume, temps, vitesse, force, potentiel électrique, etc., c'est la longueur qui se prête le mieux à la mesure. Aussi, que voit le visiteur lorsqu'il pénètre dans un laboratoire de physique ? Il remarque, dans presque tous les cas, lorsque l'expérience se déroule ou lorsqu'elle est achevée, que le physicien se borne à lire la position d'un index mobile le long d'une échelle graduée, réalisation matérielle approchée de la détermination d'un point sur une courbe. Faut-il donner des exemples ? La mesure d'une masse avec la balance demande la lecture de la position d'une aiguille sur une échelle. Même procédé pour la mesure d'une vitesse au compteur, pour celle de la force au dynamomètre. Mais qu'en est-il, demandera-t-on peut-être, en ce qui concerne la physique moderne, la physique atomique ? Eh bien, là encore, il en va de

même. Le but de l'expérience, de la mesure peut certes être très élevé, les recherches très subtiles, cependant le physicien doit combiner son dispositif expérimental de telle sorte que la mesure finale et décisive soit encore une mesure de longueur. Quand Ch.-E. Guye déterminait la variation de la masse des électrons en fonction de leurs vitesses, il mesurait la distance séparant de petites taches de 0,5 mm. inscrites sur un cliché photographique [22]. Lorsque Millikan mesurait la charge de l'électron, il déterminait le temps et la distance parcourue entre deux fils par l'image d'une goutte d'huile microscopique. Pour connaître la masse d'un seul type d'atome, recherches qui ont conduit Aston à la découverte des isotopes, ceux de l'hydrogène $H_1H_2H_3$ pour fixer les idées, il s'est agi de mesurer trois taches sur un cliché. Enfin nous avons déterminé avec J. Weigle la distance des atomes dans les cristaux d'argent, de calcite, de chlorure de sodium ; là encore l'opération décisive consistait à mesurer la distance séparant des lignes, tracées par les rayons X, sur un film photographique.

Or la mesure de la longueur se fait en cherchant la coïncidence de l'index et des traits de l'échelle. Cette coïncidence n'est jamais exacte, mais seulement plus ou moins précise.

Un abîme existe entre les significations de ces deux mots *exact* et *précis*. Et pourtant avec quelle insouciance — cause de bien des malentendus ! — cet abîme n'est-il pas franchi aussi bien dans la vie courante que dans la discussion philosophique.

Exact convient aux opérations faites par l'esprit avec les êtres mathématiques et sur eux ; car sur ce plan, ces êtres sont simples, nécessaires, abstraits, idéaux, parfaits. Le résultat d'un calcul est exact ou irrecevable. Il est ou juste ou faux. Il n'y a pas de degrés dans l'exactitude. Celle-ci est pleine et parfaite ou ne l'est pas. Une proposition, un résultat exacts sont des vérités rationnelles, nécessaires, universelles ; elles sont accompagnées de certitude apodictique. Un résultat exact est rigoureux. Il n'y a pas de place pour une erreur si petite soit-elle.

En revanche sont précises les opérations faites avec des êtres extraits du monde sensible, du monde expérimental. Sur le plan

---

[22] Ch.-E. Guye, Vérification expérimentale de la formule de Lorentz-Einstein. Kundig, Genève, 1921.

physique, en effet, les êtres sont complexes, contingents, concrets, la connaissance que nous en avons est sujette à revision, car ils sont imparfaits, en perpétuel devenir. Les résultats acquis par l'expérience seront plus ou moins précis, subordonnés qu'ils sont au degré d'acuité de nos sens, à la sensibilité de nos appareils de mesure. Il y a des degrés dans la précision. Et mon dessein est de montrer jusqu'où peut aller cette précision dans notre connaissance du monde physique.

Enfin une proposition qu'on pourrait appeler une *vérité d'expérience* est empirique, contingente, approximative et particulière en son objet, elle est accompagnée d'évidence assertorique. A rigoureux et exact, j'oppose ainsi approximatif et précis.

Si les mathématiques sont une science exacte donnant des certitudes par la rigueur absolue des démonstrations, la physique moderne est à la fois une science exacte par son aspect théorique (ne dit-on pas physique mathématique) et une science précise grâce à sa méthode expérimentale qui recourt à la mesure comme moyen de vérification, pour ne parvenir cependant qu'à des probabilités. Le physicien théoricien Dirac, éminent savant anglais, a très bien résumé cela en disant que la physique théorique calcule *a priori* des résultats qui devront être vérifiés par l'expérience.

Une mesure n'est donc jamais *exacte*, elle n'est que plus ou moins *précise*. De quels facteurs dépend cette précision ? Elle dépend de l'appréciation des lectures de l'échelle et de la valeur numérique, c'est-à-dire de la mesure de la grandeur envisagée. En d'autres termes, la précision de la mesure sera exprimée par le quotient *appréciation/mesure de la grandeur*. Ainsi, quand je mesure une longueur de 10 cm. avec une règle qui me permet de lire le millimètre, la précision sera de 1%, et si j'apprécie un écart d'une seconde dans la marche journalière d'une montre, cette mesure sera précise au cent-millième (les mathématiciens disent plus volontiers *erreur absolue* pour appréciation, et préfèrent *erreur relative* à précision).

Il faut se demander, ce qui est utile pour la suite, quels sont les ordres de grandeur des précisions des mesures usuelles et des mesures extrêmes atteintes en physique. On a déjà vu que les premiers résultats qui nous soient connus, ceux de Ptolémée et de Galilée, l'ont été avec une précision de quelques unités

pour cent. C'est encore à un résultat de cet ordre que parviennent les élèves dans les premiers travaux qu'ils exécutent au laboratoire. Une précision d'un pour mille à un pour dix mille est déjà assez difficile à atteindre ; elle n'est même pas toujours possible. La précision, en effet, dépend de l'objet à mesurer, de l'appareil de mesure, de l'habileté de l'expérimentateur et de la plus ou moins grande rapidité de ses réflexes.

Ainsi, par exemple, parler de mesurer la longueur d'une table au millionnième ne signifie rien, car si l'on effectue les opérations nécessaires, on trouve en sa forme rectangulaire des différences de quelques millimètres. Cet exemple banal mérite cependant que nous nous y arrêtions. Il nous apprend, en effet, que cette table est définie, par construction, seulement au millième près. Elle est construite au millième près. Dans sa longueur et dans sa largeur, elle s'écarte d'un pour mille du rectangle géométrique exact, donc inaccessible. Elle nous montre un objet réel défini et construit au millième. Ce serait donc une phrase vide de sens que celle où l'on parlerait de la longueur exacte de cette table. Pour les êtres de la nature, il n'existe pas de résultats exacts vers lesquels on tendrait et qu'on finirait par atteindre à la limite. Non, tout ce que l'on peut affirmer, c'est que cette table a des dimensions comprises entre 1325 et 1327 millimètres par exemple.

Par convention et par commodité, nous pourrons cependant dire que la longueur de la table est de 1326 millimètres, c'est-à-dire prendre la moyenne des différentes mesures, mais ce n'est là qu'une convention.

Qu'en est-il, dans la conception que nous nous en faisons actuellement, des objets ultimes du monde physique, des molécules, atomes, électrons et noyaux atomiques ? Sont-ils définis et construits par la nature d'une manière exacte telle que le sont les êtres mathématiques ou sont-ils construits avec une précision qu'on peut déjà connaître actuellement ?

Prenons, par exemple, un objet que l'on s'accorde à considérer comme particulièrement bien construit par la nature : un cristal de diamant ou de calcite. Les rayons X permettent de déterminer la disposition spatiale des atomes qui constituent ce cristal. Ils nous révèlent si cette disposition est aussi régulière que l'aspect visuel du cristal le laisserait supposer. Cela est

possible car un cristal est un milieu formé de corpuscules disposés de manière périodique, et la marche de la lumière qui traverse ce milieu est perturbée d'une manière telle, qu'à la sortie du cristal elle donne sur une plaque photographique une image de la disposition des atomes rencontrés. Ainsi un cristal qui semble parfait à l'œil (ne parle-t-on pas de la pureté du cristal ?) peut avoir certains de ses atomes situés de part ou d'autre de la position géométrique exacte qu'ils devraient occuper. Les mesures montrent que la précision dans l'ordonnance de l'édifice du cristal comparée à celle du cristal idéal, est comprise selon les exemplaires envisagés entre un pour mille et un pour cent mille. En d'autres termes, les nombres qui serviront à indiquer les coordonnées du centre de gravité des atomes, ne contiendront que quatre à six chiffres significatifs. C'est peu si l'on songe que sur le plan mathématique on peut connaître π ou $\sqrt{2}$ avec autant de chiffres qu'on le désire et cela sans avoir à faire ni mesure, ni expérience !

Et ces rayons X, eux-mêmes, cette lumière qui nous vient du plus profond de l'atome, pouvons-nous la connaître exactement ou seulement avec une certaine précision ? Là encore, l'observation nous apprend que les raies spectrales ne sont pas des lignes mathématiques mais bien de petites bandes ayant une largeur mesurable. On a analysé l'intensité des raies pures, non entourées de satellites, obtenues avec des spectrographes de très grand pouvoir séparateur. Les mesures ont établi que cette intensité était donnée par une courbe, qui, en fonction de la longueur d'onde, rappelle une courbe en cloche (courbe de résonance) pouvant même, pour certains éléments, le cuivre entre autres, montrer une asymétrie marquée. La « largeur naturelle » de ces lignes, largeur indépendante de l'appareil de mesure, varie d'un élément à l'autre. Elle est déterminée par le processus même de la naissance de la lumière au sein de l'atome. Ainsi une des raies les plus fines, la raie K du molybdène, dont la longueur d'onde est $0{,}707\,831 \cdot 10^{-8}$ cm., a une largeur mesurable de $2{,}9 \cdot 10^{-12}$ cm., soit 2,9 millionièmes de millionième de cm. On doit donc constater, ici encore, pour la précision de la définition des raies spectrales, une limite naturelle.

Nous sommes ainsi arrivés avec les mesures modernes les plus sensibles à atteindre la limite de l'« exactitude naturelle » au

delà de laquelle la nature ne présente plus de rapports constants.

Les nombres et les paramètres qui caractérisent les objets ultimes, atomes, électrons, ne sont pas définissables au delà d'une certaine grandeur, et cela de par leur nature même. On sait que les théoriciens de la physique rendent compte de ce fait. Il est une conséquence, selon l'échelle d'observation où l'on s'est placé, soit des phénomènes de « fluctuations », soit du principe d'indétermination de Heisenberg. Mais je désire ici m'en tenir uniquement à des considérations sur les mesures, laissant de côté la discussion du rôle ordonnateur de la théorie.

Pour conclure ce paragraphe, j'aimerais signaler les résultats ultimes les plus récents pour les trois grandeurs fondamentales : Longueur, Masse, Temps, ceci pour montrer jusqu'à quelles limites nous pouvons vérifier les lois.

Longueur. — La nature nous fournit, grâce à l'aspect ondulatoire de la lumière, une excellente échelle graduée ; une onde lumineuse constitue, en effet, une vis immatérielle. Aussi les physiciens se servent-ils de méthodes interférentielles pour mesurer les longueurs. Cependant, on ne peut pas faire interférer de la lumière monochromatique même très pure sur une distance beaucoup plus grande que 50 cm. environ, car les raies spectrales ont, comme je viens de le dire, une largeur naturelle non nulle. Dans la région visible du spectre, le rapport *largeur naturelle/longueur d'onde* a pour valeur maximum environ un million. Il résulte de cet état de choses que lorsqu'on fait interférer de la lumière, on ne peut apprécier que le centième de frange tout au plus, c'est-à-dire $5 \cdot 10^{-7}$ cm. On atteint ainsi pour la mesure des longueurs une précision limite du cent-millionième.

Quant à la longueur du mètre-étalon exprimée en fonction de la longueur d'onde de la raie rouge du cadmium, ainsi que les constantes optiques, elles peuvent être données par des nombres de huit chiffres significatifs. La constante de Rydberg, par exemple, qui entre dans la formule de Balmer, a pour valeur $R = 109\,677{,}76$ cm^{-1}.

Masse. — Les meilleures balances permettent de peser une masse d'un kilogramme et d'apprécier le centième de milligramme d'où une précision égale à celle qui est obtenue pour les mesures de longueur. (A l'échelle atomique, on parvient à

déterminer, au spectrographe de masse, la masse des noyaux des atomes, au cent-millième près. On apprécie donc 10^{-27} g.)

Temps. — Les horloges des observatoires apprécient mieux que le centième de seconde par jour. La précision dans la mesure du temps atteint donc, elle aussi et par jour, le cent-millionième.

Enfin à l'échelle astronomique, en combinant les mesures du temps sidéral poursuivies pendant un siècle, on arrive à déceler une augmentation du jour sidéral d'un millième de seconde par siècle, mettant ainsi en évidence que la durée de rotation de la terre sur elle-même n'est pas non plus une constante exacte !

Voilà les limites atteintes par l'état actuel des mesures modernes. Peut-on espérer faire beaucoup mieux et obtenir des résultats avec plus de huit chiffres significatifs et se rapprocher encore plus de l'exactitude des mathématiques ? Cela me paraît improbable. Pour justifier cette vue, qu'on jugera peut-être téméraire et bornée, il faudrait faire un examen critique détaillé du rôle des fluctuations [23] sur les résultats des expériences, ce qui nous entraînerait trop loin.

On peut cependant s'en faire une idée en discutant d'une façon sommaire la mesure des longueurs par la méthode interférentielle. Lorsqu'on a vu l'extrême mobilité des franges d'interférence, on se rend compte que l'appréciation du centième de frange ne pourra guère être dépassée. Une constance de la température au millième de degré est effectivement nécessaire pour assurer une immobilité non gênante du phénomène interférentiel qui permette une lecture certaine. Mais maintenir tout un appareil à température constante au millième de degré près est aussi une limite difficile à dépasser. Ainsi, dans une mesure de haute précision, une foule de conditions s'enchaînent les unes aux autres et exigent finalement des années de travail pour pouvoir garantir un résultat représenté par un nombre de huit chiffres.

En voici encore un autre exemple emprunté au domaine des expériences de physique atomique. Celles-ci comportent notam-

[23] Fluctuation : Si l'on a fait n lectures, la fluctuation, qui mesure l'appréciation, est de l'ordre de $\sqrt{n}$; si, par exemple, un corps radioactif émet 1000 particules, la fluctuation a pour valeur $\sqrt{1000}$ soit environ 30.

ment une réception, un enregistrement sur une plaque photographique des atomes, des électrons ou des photons, enregistrement qui se traduit généralement par des taches ou des lignes plus ou moins fines. C'est le cas, par exemple, dans le spectrographe de masse ou dans la diffraction des électrons, ou encore lorsqu'on étudie les spectres des rayons X et les structures cristallines. Il s'agit ensuite généralement de mesurer la distance entre ces lignes. On peut alors penser qu'il suffira d'agrandir le cliché ou de mesurer les distances au microscope ; ce procédé est effectivement employé. Mais cet agrandissement du cliché est limité par la grosseur même du grain, c'est-à-dire des corpuscules d'argent disséminés dans la plaque. Et les plus petits grains qu'il serait encore possible d'utiliser devront renfermer encore au moins un atome d'argent. Voilà donc atteinte, encore une fois, la limite naturelle au delà de laquelle je ne pense pas que l'on puisse beaucoup descendre.

6. *Qu'est-ce qu'une loi physique?*

Remarquons tout d'abord qu'il y a des lois — selon qu'elles contiennent ou non des constantes relatives à la nature particulière des corps envisagés — qui sont purement empiriques, comme celle qui donne la dilatation thermique de l'eau. Mais il existe aussi des lois expérimentales comme celles du mouvement uniformément accéléré de Galilée et des lois théoriques très générales telles que celles de Maxwell qui déterminent les propriétés des champs électriques et magnétiques.

Remarquons encore, en passant, la diversité des mots employés dans les traités de physique pour désigner sensiblement les mêmes rapports. On parle, en effet, de lois (loi de Mariotte), d'équations (équation de van der Waals), de formules (formule de Clapeyron), de relations (relations de Helmholtz), de courbes (courbe des tensions de vapeurs), de théorèmes (théorème des forces vives), et même de principes (principe d'Archimède).

Mais qu'est-ce donc qu'une loi physique ?

I. Une loi physique est un énoncé qui a pour but de décrire d'une manière invariante et de lier quantitativement d'une façon aussi précise que possible les événements et les phénomènes qui se sont produits, qui se produisent ou qui se produiront dans un

système physique qu'on puisse circonscrire. Cet énoncé doit permettre, lorsqu'on a pu réaliser certaines conditions de prédire ce qui va se passer, ou tout au plus, selon l'échelle d'observation, de prévoir l'évolution probable du système.

Voilà, à mon avis, ce qu'une loi doit être. Et voici comment on y parvient et ce qu'elle est en droit.

II. Pour exprimer, pour formuler le mieux possible l'énoncé de la loi, le langage le plus approprié est l'algorithme mathématique car la loi est généralement conçue comme un rapport numérique constant entre certaines grandeurs mesurables. Par suite, pour le physicien, une loi est représentée par une fonction mathématique qui opère sur des symboles ayant une signification physique généralement déjà connue. Ainsi une grandeur G sera connue en fonction d'autres grandeurs : $G = G\ (a, b, c...)$ parmi lesquelles figureront généralement le *temps* et l'*espace*. Sous cet aspect mathématique, une loi peut s'écrire soit sous forme de *loi différentielle*, soit sous forme de *loi intégrale* suivant les frontières spatio-temporelles du système envisagé.

Enfin la fonction mathématique a pour rôle de fixer une relation numérique entre des nombres résultant soit de mesures effectivement faites, soit de mesures à faire effectivement au cours d'expériences ultérieures.

III. Si l'on conçoit deux énoncés également possibles pour une même loi ou, en langage géométrique, si l'on imagine deux courbes représentatives pour la description d'un certain phénomène, on reconnaîtra pour loi du phénomène celle des deux courbes tracées a priori qui sera la mieux recouverte ou la mieux bordée par les points représentant les mesures effectivement faites, cela grâce à une précision suffisante pour séparer les deux courbes.

Un exemple est fourni par les belles mesures de Ch.-E. Guye qui devaient indiquer laquelle des deux formules, l'une proposée par Lorentz, l'autre par Abraham, pour décrire la variation de la masse des électrons en fonction de la vitesse, serait vérifiée par l'expérience. Comme ces deux formules donnaient des résultats qui, dans les limites des mesures alors possibles, ne différaient que de 3% environ, il fallait que la précision des mesures pût atteindre le millième pour séparer les deux

courbes. C'est ce qui fut effectivement obtenu par l'éminent physicien genevois (Op. cit. 22).

Plusieurs remarques sont encore nécessaires pour nuancer et compléter ce qui vient d'être dit.

A. — Pour énoncer une loi d'une manière quantitative, nous sommes obligés d'employer l'algorithme mathématique. C'est ce qui a fait dire à certains, à Duhem par exemple, que la loi est une formule mathématique. Non, la loi n'est pas une formule mathématique, mais elle s'exprime commodément par une fonction mathématique. Si tel était le cas, la loi devrait obéir aux propriétés des fonctions : à savoir être continues, dérivables, du moins pour les fonctions usuelles utilisées en physique, et indépendantes de toute échelle de mesure ; ses variables devraient encore avoir la propriété de varier de moins l'infini à plus l'infini. En outre, dans une fonction mathématique u (x, y, z), les lettres u, x, y, z sont des nombres purs sans signification physique.

Or la loi ne répond pas entièrement à ces exigences. A la place des nombres purs abstraits que sont les êtres mathématiques liés par la fonction, la loi envisage des grandeurs semi-abstraites auxquelles on doit donner des valeurs numériques définies par les unités adoptées (conventionnelles, il est vrai) et qui ne sont pas de même nature. Ainsi une loi joue avec des êtres physiques tels que force, pression, température, etc.

Ensuite, en ce qui concerne la continuité, nous avons vu que les mesures les plus précises ne pouvaient donner au maximum que des nombres de sept ou huit chiffres significatifs. Ainsi, même indépendamment de toutes considérations atomiques, les nombres qui mesurent les variables physiques, pression, température, etc., sont très loin de former un ensemble continu. Même si l'on envisageait la totalité de tous les nombres qui mesurent tous les résultats connus, toutes les propriétés des quelque 500 000 substances étudiées par les chimistes, cet ensemble serait des plus lacunaires et d'une pauvreté quasi infinie en regard d'un ensemble ayant la puissance du continu mathématique. L'aphorisme suivant illustrera peut-être d'une manière plus directe ma pensée : *Il y a plus d'infini dans le segment de droite du mathématicien que dans tout l'univers du physicien.* Car on trouve, avec davantage de certitude, l'infini en *raisonnant* sur

la droite du mathématicien plutôt qu'en *mesurant* l'univers du physicien.

Ainsi, à mon sens, la loi n'est pas une formule mathématique et la conclusion de James Jeans disant que les idées mathématiques conviennent à la nature aussi parfaitement et aussi exclusivement que le soulier au pied de Cendrillon, participe plus, me semble-t-il, de l'humour britannique que d'une conception philosophique de la question.

La fonction mathématique qui représente la loi est un symbole comme l'est le plan d'une ville ou une carte géographique. Si le plan est bien fait, si la carte est précise, il y a adéquation entre le schéma abstrait et la réalité concrète.

B. — L'énoncé de la loi, disais-je, se rapporte à un système physique bien circonscrit. En effet, toutes les lois se rapportent à des cas-limite. D'abord, la loi postule implicitement qu'il n'existe dans l'univers pensé que les êtres qu'elle envisage. Par exemple, dans la loi du mouvement uniformément accéléré de Galilée, le système conçu ne doit renfermer que le cadre espace-temps, la seule masse envisagée et une force motrice.

Ensuite, la loi nous indique ce qui se passerait dans un cas idéal. Par exemple, la loi des gaz parfaits nous donne des propriétés qui sont la limite de celle des gaz réels ; la loi de Carnot fixe une limite théorique et idéale pour le rendement d'une transformation où interviennent des échanges de chaleur et de travail mécanique. En physique atomique, la théorie de l'état solide de Born, permet de calculer les valeurs limites des charges de rupture. Les concepts tels que ceux de « gaz parfait », « cycle réversible », « solide parfait », sont des concepts limites plus pauvres que le réel.

Le monde des lois physiques est donc un monde-limite, et pour revenir au cas particulier réel et concret, il faut généralement ajouter à la loi limite trop schématique et plus pauvre que le réel, les facteurs qui furent négligés, ou encore inconnus au moment où elle fut établie.

Par conséquent, dans certains cas et plus particulièrement au point de vue des *applications pratiques* sur le plan du monde sensible, la loi empirique avec tous ses coefficients et toutes ses constantes a beaucoup plus de valeur et d'utilité.

C. — Il faut noter, à propos du cadre spatio-temporel dont la loi a besoin pour donner une description précise des événements et des phénomènes physiques — que les Grecs n'avaient d'idées claires ni sur la notion d'espace, ni sur celle de temps.

Espace. — Dans une intéressante étude sur Copernic, Rolin Wavre a montré qu'il existait dans la pensée antique, une certaine ambiguïté entre la métrique euclidienne et un espace physique hétérogène, anisotrope, fini et n'admettant pas de similitude. Newton le premier, au XVIIe siècle seulement, « sépara et pour longtemps les deux plans. L'espace d'abord, qui préexiste indépendamment de la matière ; les corps ensuite accompagnés des éléments dynamiques »[24].

L'ambiguïté signalée par R. Wavre se retrouve encore chez les Cartésiens, qui n'admettaient pas l'existence du vide. Descartes est encore si convaincu qu'il ne saurait y en avoir, que, selon lui, les parois d'un vase que l'on pourrait complètement vider devraient immédiatement venir en contact. « L'horreur du vide » — comme le dit Pascal dans son fameux récit de la grande expérience sur l'équilibre des liqueurs, et par laquelle « les philosophes ont tous tenu pour maxime que la nature abhorre le vide et qu'elle se détruirait elle-même plutôt que de le souffrir » — montre bien les difficultés que dut vaincre Otto de Guericke pour prouver à ses contemporains l'existence de ce vide proscrit.

La croyance en la preuve expérimentale de l'existence du vide, telle qu'on la concevait alors, a certainement beaucoup contribué à former l'idée d'un espace distinct des objets qu'il renferme et c'est elle qui a permis à Newton de jeter les bases de sa mécanique.

Temps. — Bien qu'Aristote consacre dans sa « Physique » la fin de son Livre IV à l'étude du problème du temps, « la science grecque n'a pas étudié les mouvements qui se déroulent sur la terre. Elle préférait l'immuable au changeant, l'immobile au mobile, l'invariant à la transformation ».

« La flèche de Zénon frémissait en volant au-dessus du continu mathématique et bien des philosophes condamnaient le

[24] Rolin Wavre, A propos de Copernic, Revue de Théologie et de Philosophie, avril-juin, 1944.

mouvement. L'immuable pour eux était seul un reflet de l'éternité. »

« Bergson a dit quelque part ceci qui me paraît particulièrement vrai : c'est la Renaissance italienne qui a introduit le temps comme variable indépendante. »

« C'est Léonard de Vinci, Galilée et quelques autres savants de la Renaissance qui, les premiers, ont étudié quantitativement l'évolution d'une expérience au cours du temps. Mais on peut reconnaître à Galilée un autre mérite encore. Il a introduit, dans les équations de la mécanique, l'accélération. »[25]

Ces remarques de R. Wavre sur l'histoire des notions de temps et d'espace, montrent que la loi n'a pris toute sa signification qu'à partir du milieu du XVIIe siècle.

D. — Puisque c'est « l'échelle d'observation qui crée le phénomène » comme l'a dit mon maître Ch.-E. Guye [26], c'est encore l'échelle d'observation qui doit donner la signification et les limites de validité des lois. Distinguons alors :

1° Les lois qui portent seulement sur un ou deux objets assimilés à des points matériels. Ce sont les lois élémentaires valables pour des objets ponctuels comme la loi de la gravitation universelle de Newton et les lois de Coulomb en électricité. A cette échelle, les phénomènes sont réversibles et périodiques, puisque le système ne comprend que quelques objets (deux seulement si on veut appliquer la loi en toute rigueur) et le déterminisme le plus rigoureux préside à la marche des corpuscules.

2° Les lois qui sont chargées de décrire l'évolution des systèmes renfermant un très grand nombre de corpuscules (assimilables ou non à des points matériels), comme l'est un gaz ou un morceau de matière quelconque. Ce système ne peut, vu sa trop grande complexité, être décrit pour ainsi dire que du dehors. Et l'on se trouve en présence des lois statistiques se traduisant par les inégalités de la thermodynamique. La description du système qui évolue d'une manière irréversible, permet

---

[25] Rolin Wavre, Galilée et le Problème du temps. « Gesnérus », vol. 1, 1943.

[26] Ch.-E. Guye, L'évolution physico-chimique, 2e édition, Paris, Hermann, 1942, p. 49.

de dire qu'il doit passer d'un état moins probable à un état plus probable.

Ainsi, si j'abandonne dans le vide une masse ponctuelle, un point matériel, sa chute est une *nécessité* résultant de la loi de Newton, mais si de la chaleur passe d'une source à température plus élevée sur une autre à température moins élevée, c'est une *probabilité* régie par la loi de Carnot sous la forme que lui a donnée Boltzmann.

3° Les lois de la microphysique. — Les admirables travaux de J. Piaget ont montré que la notion d'objet se construit chez l'enfant en même temps que les relations spatiales. Pour le bébé, c'est à partir d'une année et demie environ que l'objet est devenu quelque chose de permanent, indépendamment des déplacements qu'il peut subir. Mais les expériences, que tous les enfants peuvent faire pour devenir capables de construire la notion d'objet, n'ont pas trouvé leurs pendants à l'échelle atomique et ont été longtemps refusées aux physiciens qui s'occupaient des corpuscules ultimes.

C'est parce que nous n'avons aucune intuition du monde atomique que les lois de la microphysique nous paraissent si déconcertantes. A ce niveau, les catégories de temps et d'espace perdent leur signification et une description purement causale — au sens laplacien — n'est plus possible. Le principe d'incertitude de Heisenberg, qui fixe une limite à la précision des déterminations expérimentales, joue en plein, comme l'ont montré plusieurs expériences de physique atomique effectivement réalisées. Je pense en particulier aux belles expériences de Stern et Gerlach sur la marche d'un jet d'atomes dans un champ magnétique hautement inhomogène, ainsi qu'à celles portant sur la diffraction des électrons par les réseaux cristallins. J'ai dit « expériences effectivement réalisées », car dans certains cas, l'on justifie le Principe de Heisenberg à l'aide d'exemples d'expériences fictives non réalisées dans les laboratoires. Ces questions ont été examinées d'une manière très approfondie par Heisenberg [27].

Aussi pour pouvoir conserver le cadre habituel de l'espace-temps à l'échelle atomique, il a fallu substituer aux objets eux-

[27] W. Heisenberg, Les principes physiques de la théorie des quanta. Paris, Gauthier-Villars, 1932, p. 67.

mêmes une fonction mathématique (la fonction psi) qui, moyennant certaines conditions, s'interprète comme une probabilité. Et c'est par l'intermédiaire de cette probabilité, qui, elle, reste une fonction continue, bien déterminée et finie dans un espace de configuration, que les physiciens peuvent donner une description de l'évolution des systèmes atomiques [28].

E. — Il y a une hiérarchie des lois ; en effet, dans l'ensemble des lois connues, il y en a qui ont plus de valeur que d'autres, que nous jugeons plus fondamentales que d'autres.

Quel critère employer pour discerner lesquelles seront jugées dignes de figurer au premier rang ? Faudra-t-il prendre les lois élémentaires qui déterminent la marche des corpuscules uniques telle que la loi de la gravitation de Newton, ou bien les lois statistiques qui embrassent un grand nombre de particules, ou les lois empiriques, ou bien encore les lois expérimentales ?

Ce seront évidemment celles que l'on pourra expliquer, celles qu'une théorie permettra de retrouver, de démontrer. J'ai dit *évidemment*, car l'esprit humain tend invinciblement à réduire le multiple à l'unité, et expliquer, c'est précisément rendre intelligible. C'est faire en sorte que notre esprit se représente les choses comme possibles et nécessaires. On rend une loi intelligible en la ramenant à une loi plus générale ou en la rattachant à une théorie. Par exemple, la loi du mouvement uniformément accéléré de Galilée n'est qu'un cas particulier de la dynamique newtonienne ; elle s'obtient en intégrant l'équation du mouvement sous l'action d'une force constante. De même la loi de Mariotte se démontre par la théorie cinétique des gaz et celle de Balmer relative à l'émission des séries spectrales de l'hydrogène est une conséquence de la théorie de l'atome de Bohr ou d'une manière plus rigoureuse de l'équation de Schrödinger en mécanique ondulatoire.

L'une des tâches de la théorie physique est ainsi de démontrer les lois déjà découvertes et, pour mériter pleinement son titre, de donner l'énoncé de lois nouvelles qui devront être vérifiées par l'expérience.

A ce propos, André Mercier nous apprend que le théoricien doit retenir comme lois les plus fondamentales les *lois d'inter-*

[28] Voir le très beau livre de Louis de Broglie, Continu et discontinu en physique moderne.

action. Par exemple, la loi de Newton qui donne l'interaction entre deux masses ponctuelles quelconques ou encore la loi de Fermi qui régit l'interaction nucléaire entre protons et neutrons. Ces lois permettent de déterminer les états et les valeurs propres d'un système particulier. En effet, dit-il, « déterminer des états propres et des valeurs propres, c'est décrire la Nature. On y parvient grâce à la découverte des lois de la Nature qui sont des lois d'interaction ». Ainsi « la notion d'interaction est utilisée dans toute la physique. Les lois de la physique classique autant que celles de la physique moderne sont des lois d'interaction. C'est seulement la manière de les exprimer mathématiquement qui change selon le schéma constructif de chaque théorie particulière »[29].

G. — L'expérience a conduit les physiciens à introduire dans certaines de leurs lois des constantes — envisagées comme des valeurs limites — accessibles ou non à une mesure directe. Sans vouloir les citer toutes ici[30], voici cependant quelques-unes de ces constantes fondamentales. Elles sont liées à l'*espace*, au *temps*, à la *matière* et à la *lumière*.

$c = 3.10^{10}$ cm/sec. $\Theta_0 = -273{,}2\,^0$ C $h = 6{,}55.10^{-27}$ ergs.sec.

a) La vitesse de la lumière, bien que très grande, n'est cependant pas infinie : elle est très voisine de la constante c. C'est cette valeur *finie* qui a conduit Einstein à son principe de relativité restreinte obligeant physiciens et philosophes à élargir leurs concepts sur le *temps* et l'*espace*.

b) La température, exprimée en degrés centigrades, ne peut pas décroître indéfiniment. Elle est limitée par la constante Θ_0 qui est le zéro absolu. Ce zéro fixe une borne inaccessible, à l'origine des températures, c'est-à-dire aux mouvements désordonnés des molécules dont l'assemblage forme la *matière* telle qu'elle apparaît à nos yeux.

A. Schidlof a démontré autrefois[31] que la température du zéro absolu, ainsi que les températures infiniment voisines sont

---

[29] André Mercier, Considérations épistémologiques sur la physique moderne. Annuaire de la Société suisse de Phil. Vol. 11, 1942, p. 145.

[30] André Mercier, Constantes universelles, Actes de la Soc. Helv. des sciences naturelles, 1944. p. 61.

[31] A. Schidlof, Sur l'impossibilité théorique du zéro absolu. Journal de chimie physique, 1926, p. 814.

dépourvues de toute signification physique et il a établi l'impossibilité théorique du zéro absolu.

c) Le concept de *vide absolu* peut se rattacher à celui de zéro absolu. C'est aussi une notion limite sans signification physique. Le *vide* actuel des physiciens possède encore des propriétés électro-magnétiques, propriétés permettant la naissance de la matière ainsi que son annihilation. Je pense aux découvertes faites il y a une dizaine d'années par lesquelles les physiciens ont réussi à saisir sur le vif la transformation d'un photon en une paire d'électrons positif et négatif et la réciproque : l'annihilation d'une paire d'électrons positif et négatif et leur transformation en un photon.

d) La notion d'exactitude absolue, avec laquelle il serait théoriquement possible d'effectuer des mesures parfaites, doit être abandonnée et remplacée par celle de précision. Celle-ci est limitée, sur le plan théorique, par la constante h intervenant dans les relations d'incertitude de Heisenberg.

Il est clair que ces concepts — à l'échelle humaine et pour l'homme de la rue — ne sont pas usuels et qu'ils restent, apparemment, sans importance pratique ; c'est à l'échelle atomique ou cosmique qu'ils jouent un rôle décisif. Ce sont eux qui ont été les agents des révolutions, toutes pacifiques, qui ont fait progresser la physique et l'ont conduite dans son état actuel.

H. — Si je n'ai pas mentionné les *lois qualitatives*, c'est qu'un énoncé de ce genre n'est, me semble-t-il, que la description du fait brut.

La proposition : *un courant électrique passant dans un élément de circuit crée dans son voisinage un champ magnétique*, ne constitue pas une loi. Ce n'est que l'exposé du fait constaté. La loi est beaucoup plus riche. Elle doit donner, en plus de l'énoncé qualitatif, des indications quantitatives permettant de calculer la valeur et la direction du champ créé.

Il faut cependant remarquer qu'un énoncé qualitatif peut être exact. Si je dis : le petit Larousse se trouve sur le troisième rayon de ma bibliothèque, cet énoncé est juste ou faux, il n'y a pas d'incertitude. L'énoncé a une valeur absolue car l'objet est à l'endroit désigné ou il n'y est pas.

Emile Borel a fait des remarques fort judicieuses sur les dis-

tinctions à établir entre des jugements qualitatifs et quantitatifs. « Qu'il s'agisse de couleurs, qui se ramènent à des longueurs d'onde ou des espèces chimiques plus ou moins pures, la qualité se ramène à la quantité, dès qu'on veut bien regarder le problème de près. » — « On voit, dit-il encore, que la théorie que nous venons d'esquisser, et qui reste sur le terrain concret des déterminations quantitatives, est fort différente des spéculations logiques des philosophes sur la valeur de l'induction dans lesquelles ils considèrent le plus souvent des jugements qualitatifs, lesquels peuvent avoir, à leurs yeux, une valeur absolue, tandis qu'un jugement quantitatif, c'est-à-dire une mesure, ne peut jamais avoir qu'une valeur relative, puisque le résultat n'est jamais connu qu'avec une certaine approximation. »

« On peut se demander s'il n'y a pas une certaine illusion dans le fait d'attribuer une valeur plus grande aux jugements qualitatifs qu'aux jugements quantitatifs, qui paraissent, au contraire, aux yeux des savants, avoir une plus grande précision, malgré l'incertitude qui résulte des approximations. »[32]

7. *Conclusions.*

Enoncer la loi, la démontrer mathématiquement dans le cadre d'une théorie physique, puis la vérifier expérimentalement, telles sont les trois exigences qui s'imposent au physicien moderne et dont l'accomplissement donne sa fécondité à la loi, disais-je à propos de Galilée.

C'est que, pour le physicien, une proposition ou une question n'a de sens que si elle a été vérifiée par des expériences effectivement faites. Il ne suffit pas, en effet, que la proposition énoncée soit démontrée sur le plan logique, il faut encore que l'on puisse imaginer une méthode d'observation, un mode opératoire qui permettrait de lui donner une réponse satisfaisante.

Pour cela, on n'expérimente généralement pas au hasard, mais bien en vue de vérifier un ensemble d'idées « a priori » formant un tout harmonieux et cohérent résumé dans une loi. Le physicien se pose un problème ou une question et demande à la nature si ceux-ci ont un sens. Pour cela, certaines lois peuvent

[32] Emile Borel, Valeur pratique et Philosophie des probabilités, Paris, Gauthier-Villars, 1939, p. 35 et 36.

servir à définir de nouvelles grandeurs et indiquer les opérations à effectuer pour atteindre et mesurer les grandeurs envisagées.

Il y a donc, dans n'importe quelle expérience de physique classique ou atomique, toute une préparation théorique sous-jacente — dont le visiteur qui traverse un laboratoire n'a pas le moindre soupçon — formant la partie mentale de l'expérience et qui est tout aussi importante que la partie purement manuelle et instrumentale. Aussi dans l'état actuel de la physique, la loi est-elle généralement déjà élaborée sur le plan théorique. Il faut encore descendre sur le plan du monde sensible pour la vérifier expérimentalement. Pour cette dernière opération, c'est la précision des mesures qui est déterminante et qui permet seule les discriminations exigées. Cette précision ne peut cependant pas dépasser une certaine limite, le cent-millionième par exemple, car la nature même du monde physique ne permet guère d'aller beaucoup plus loin.

Toutefois, il faut encore tenir compte des dispositions psychiques conscientes et inconscientes de l'expérimentateur. Car, à l'intérieur des frontières du système envisagé, on rencontre l'expérimentateur, l'appareil de mesures et l'objet en expérience. La précision de la mesure est donc limitée par l'imperfection et l'interaction des diverses parties, humaines et matérielles, sujet et objet, qui constituent le système global. En définitive, il faut considérer la *totalité* formée par l'être pensant et le monde extérieur, l'être pensant qui énonce et établit les lois et le couple : *être-pensant monde-extérieur* qui permet la vérification de la loi. Ou encore, pour parler comme Rolin Wavre [33], il faut envisager la pensée qui invente la question et l'ensemble pensée et monde extérieur qui permet de découvrir la réponse.

Les phénomènes réels qui se déroulent dans l'univers obéissent-ils à des lois naturelles rigoureusement exactes ? L'homme, dans son interrogation passionnée de la nature, parviendra-t-il à saisir ces lois ou sont-elles trop complexes pour son entendement limité ? Ces questions que beaucoup se sont posées, n'ont,

---

[33] Rolin Wavre, Inventer et découvrir, Annuaire de la Soc. de philosophie, vol. 11, 1942, p. 147.

me semble-t-il, pas beaucoup de sens, puisque dans le monde sensible et sur le plan physique les meilleures réponses actuelles de la nature se font par des nombres renfermant au maximum huit chiffres, ce qui est déjà beaucoup.

On peut, néanmoins, toujours supposer qu'il existe, à la limite, des lois exactes qui se trouveraient au delà de nos investigations expérimentales et de nos conceptions théoriques. C'est là une hypothèse métaphysique ; c'est un acte de foi nécessaire comme stimulant pour la recherche scientifique et un but idéal tracé à la nature vers lequel elle devrait tendre s'il n'y avait pas d'irrationnel.

On retrouve une orientation philosophique semblable chez les physiciens pour lesquels il existe — en dessous des relations d'incertitude de Heisenberg — un déterminisme causal rigoureux inaccessible ; déterminisme qui régit — en l'absence de l'expérimentateur venant perturber le système envisagé — l'évolution de l'univers. On a toutefois démontré l'inexistence de paramètres cachés, paramètres dont l'ignorance où nous serions de leur valeur, nous empêcherait de saisir un déterminisme absolu [34].

Si, d'autre part, j'ai évité volontairement, au cours de ce travail, l'emploi de l'expression *loi naturelle*, pourtant consacrée par l'usage, c'est que, à mon sens, la loi n'existe que dans ma pensée et par elle : *la loi est le produit de mon esprit dans sa tentative de coordonner les expériences qu'il a pu faire sur le monde extérieur*. Car « la seule manière d'appréhender l'univers matériel est d'être attentif aux actions qu'il exerce sur notre organisme »[35]. C'est la première chose dont nous devons convenir quelles que soient nos tendances philosophiques et les coordinations plus ou moins logiques que nous effectuerons par la suite.

Si les hommes n'existaient pas, il y aurait néanmoins des processus naturels — physiques, géologiques et biologiques entre-

---

[34] Le lecteur trouvera dans « La théorie et l'observation en mécanique quantique » due aux physiciens F. London et E. Bauer, une étude pénétrante, faite d'un point de vue théorique, de cette question. Actualités scientifiques, N° 775, Hermann, Paris.

[35] Rolin Wavre, Intuitions immédiates et médiates, Rev. de Théol. et de Phil. 1940.

mêlés — mais point de lois ni de théorèmes. Ainsi la proposition : *la vitesse de la lumière est une constante,* est un jugement sur des notions posées par mon esprit et, en tant que proposition, ce n'est pas une réalité indépendante de tout être pensant. On pourrait d'ailleurs en dire tout autant de n'importe quelle autre loi physique. Et Ch.-E. Guye n'a pas manqué de dire : « A côté du mystère de ces lois, aux effets infiniment complexes, il y a donc le mystère non moins grand de l'être pensant, sans lequel ni l'échelle d'observation, ni par conséquent le phénomène ne pourraient exister. »[36]

Il en fut de même pour London et Bauer pour qui « ... l'idée d'un monde observable, totalement indépendant de l'observateur, était une idée vide » ... « les physiciens furent entraînés, pour ainsi dire, malgré eux à découvrir que le formalisme de la mécanique quantique, implique déjà une théorie bien définie de la relation entre l'objet et l'observateur, relation bien différente de ce réalisme naïf qui semblait jusqu'alors une des bases nécessaires de toute science de la nature »[37].

Ces dernières remarques laissent entrevoir qu'il n'y a pas une coupure, une séparation radicale entre le sujet et l'objet. Les points de vue, apparemment irréductibles, des idéalistes et des réalistes doivent se rejoindre dans cette totalité formée par le sujet pensant et l'objet pensé ; le sujet qui invente et l'objet qu'il découvre ; totalité au sein de laquelle, comme l'a si bien dit Maurice Gex, « il devient de plus en plus ardu et artificiel de distinguer ce qui vient de l'esprit créateur et ce qui émane d'une expérience pure, abstraitement conçue comme telle, tant est intime l'interpénétration de ces deux facteurs »[38].

J'exprime ici ma gratitude aux membres de la Section genevoise de la Société de Philosophie pour les remarques et les suggestions qu'ils ont bien voulu me faire à propos de ce travail. Je désire remercier particulièrement Messieurs les Professeurs Henri Reverdin, Maurice Gex, André Mercier, Edmond Rochedieu et Rolin Wavre, ainsi que mes collègues Paul Rossier, Bernard Susz et Robert Wiblé pour leurs bons conseils.

---

[36] Ch.-E. Guye, Op. cit. p. 49.

[37] F. London et E. Bauer, Op. cit. p. 7.

[38] M. Gex, Annuaire de la Soc. suisse de Phil. vol. IV, 1944, p. 73.