Zeitschrift: Bulletin de la Société Vaudoise des Sciences Naturelles
Herausgeber: Société Vaudoise des Sciences Naturelles
Band: 69 (1965-1967)
Heft: 325

Artikel: Le concept de loi dans la physique moderne
Autor: Gouiran, Robert
DOI: https://doi.org/10.5169/seals-275821

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: 08.01.2026

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

Bulletin de la Société vaudoise des Sciences naturelles
N° 325 1967 Vol. 69, Fasc. 9

Le concept de loi dans la physique moderne [1]

PAR

ROBERT GOUIRAN [2]

La silhouette psychologique du mot loi est aussi vaste qu'imprécise et réclame encore un effort philosophique d'élucidation. Ce n'est pas sans raison que le langage n'a qu'un mot pour la loi, qu'elle soit scientifique, juridique ou morale, car dans chacune de ces manifestations elle demeure le symbole de la règle, de la norme à laquelle se plie et doit se plier le plus grand nombre.

La loi est une émanation du mythe de la maîtrise et du pouvoir. Par elle, l'homme cherche à faire coïncider le phénomène avec un archétype, à « forcer le réel » afin de s'identifier avec l'idéal convoité ; on trouve encore une dramatique ambiguïté entre la norme et l'idéal, ambiguïté qui va autoriser l'usurpation, et nous verrons que le mythe de l'usurpation se dessine encore jusque dans la loi scientifique.

Pour illustrer ces difficultés, citons CLAUDE BERNARD : « Le mot exception est antiscientifique ; dès que les lois sont connues, il ne saurait y avoir d'exception. » Il faut comprendre cette déclaration un peu péremptoire comme l'argument d'une méthode rigoureuse et non comme une prise de position philosophique. En effet, C. BERNARD a raison dans l'absolu, mais il ne parle pas de la durée ; car ce type de loi parfaite ne peut être atteint qu'*asymptotiquement* au bout du temps infini de l'éternité, et n'est alors qu'un concept vide. Nous savons maintenant que la physique moderne s'édifie en fait sur les violations des lois.

Pour commencer, considérons que la loi, avant tout, contient de l'information sur le monde. L. BRILLOUIN (1956) nous montre comment l'information consomme de la « négentropie » et dégrade, en qualité, l'énergie du système observé. Une loi « informante » va donc un peu épuiser le phénomène et cela d'autant plus qu'on s'approche de l'infiniment petit ; elle plonge ses racines avides dans le réel, dans notre propre aventure, car elle est une des formes par lesquelles nous construisons notre univers : en le consommant. Mais considérons un théorème de géométrie décrivant des rapports nécessaires entre des parties, quel est son contenu informatif ?

[1] Conférence donnée à Lausanne le 14 juin 1967 devant la Société vaudoise des Sciences naturelles.

[2] Adresse : Division PS, CERN, Genève 23.

Infini, répond L. BRILLOUIN. C'est juste en un sens, mais il ne faut pas se cacher le paradoxe, car une quantité infinie d'information ne s'obtient qu'avec une énergie infinie, laquelle ne peut provenir que de l'annihilation totale de notre monde. Nous sommes simplement là en face d'une loi d'essence, qu'HUSSERL nous apprend à distinguer des lois de fait et son contenu informatif peut aussi bien être décrit comme nul. Le théorème de géométrie procède à l'élucidation des propriétés de la figure et non à leur explication, il opère une maïeutique, c'est-à-dire un accouchement. C'est ainsi que SOCRATE prouvait à l'esclave de Ménon qu'il connaissait la géométrie sans s'en douter.

Examinons la loi empirique seule, isolée de toute théorie ; elle contient bien d'abord une information, le résumé des faits, en quelque sorte la perception du sensible, mais une perception qui doit être englobée, soutenue par une intention, par un souffle de causalité qui correspond à la signification, signification insérée dans un projet qui, lui, ne contient pas d'information, au sens énergétique du terme. Il y a donc bien les deux phases, perception et signification. Mais quelle peut être cette signification qui vient s'ajouter à l'information pour en faire une loi ?

E. SCHRÖDINGER (1954) nous rappelle que l'esprit scientifique naquit à Milet avec THALÈS : « La Nature peut être comprise », par comprise, sous-entendez maîtrisée. Alors les lois se créent, par l'homme pour l'homme, elles sont construites, elles sont dès le départ intention et appuient le projet de survie : elles sont les formes nécessaires par lesquelles l'homme se représente son destin, et il doit se le représenter pour pouvoir s'y opposer et le transformer en projet. Au-delà de la loi, il y a le *télos*, nous sommes donc en présence d'un projet intentionnel spécifiquement humain, et l'information seule n'est pas suffisante pour avoir une loi.

Un calculateur électronique pourrait faire de la science sans loi en recompilant toujours les résultats acquis ; mais il aura fallu lui apprendre un principe causal. Le contenu informatif d'une loi, c'est donc pour nous une mémoire tronquée dans laquelle on a insufflé l'idéologie de la causalité nécessaire à la survie et à l'évolution.

La loi empirique est donc d'abord synthétique et n'atteindra jamais, si ce n'est à la fin des temps, l'analytique d'une loi idéale. L'idée qui se forme après cette loi est un rêve, un modèle, une hypothèse, car il n'y a pas de lois naturelles dans la sphère ontologique formelle des idées.

Dans le vocabulaire de LALANDE, on trouve : « Loi : formule permettant de déduire d'avance les faits en partant d'un certain ordre. » Formule ? Elle doit être formulée, donc elle est langage, elle appartient au monde abstrait du langage et non à celui des objets, elle se dit mais ne peut pas se montrer. Ce n'est donc pas la loi qui déduit mais moi, dans un acte différent qui donne à la loi sa forme dynamique, c'est-à-

dire une prédiction d'un phénomène (moi déduisant) qui évolue le long du temps.

Considérons maintenant l'aspect phénoménologique. On croyait jadis (MONTESQUIEU) que les lois étaient les rapports *nécessaires*. Pour nous dégager de cette erreur, HUSSERL décrit d'abord les *lois d'essence* qui s'appliquent aux objets dépendants pour fixer les rapports nécessaires entre les parties qui font l'ensemble d'un tout plus vaste ; ces lois analytiques ne supposent pas l'existence mais indiquent qu'il y a compatibilité, recouvrement, chevauchement des essences de A et de B. Mais il les oppose aux *lois de fait*, ce deuxième volet, qui sont les seules formes synthétiques que puisse atteindre la science car elle s'appuie sur du vécu [1].

Un théorème géométrique est une loi d'essence, car il décrit ce qui est implicitement contenu dans la figure idéale. On voit que la tendance à géométriser la physique est une tentative désespérée pour atteindre l'inatteignable, l'essence des choses. Que veut dire « géométriser » ? C'est présenter le phénomène dans un espace pur, géométrique, où tous les paramètres se mesurent en *équivalents* de la même dimension. C'est un vieux rêve. Géométriser, c'est *normaliser* le sensible, le ramener à des équivalences, en faire une émanation du principe d'identité. Alors, dans une géométrie généralisée (la géométrodynamique de WHEELER, par exemple) les lois physiques deviennent de simples changements d'unités régis par les « constantes physiques », et que ces constantes varient n'enlève rien au caractère nécessaire de leur définition.

Mais HUSSERL le répète : « Les lois de la nature ne sont pas des lois d'essence. » Vouloir faire de $E = mc^2$ une loi d'essence, c'est marquer une intention. Il est probable que la loi de fait est inspirée par une loi d'essence qui la présuppose comme un désir, mais elle ne deviendra équivalence qu'au bout d'une trajectoire indéfiniment étirée. Citons HUSSERL dans sa 6e Recherche logique : « (...) L'idée de fonder des lois catégoriales (donc des lois d'essence) à l'aide de la sensibilité (donc du phénomène perçu) représente le passage d'un genre à l'autre des plus évidents. Le problème de la signification réelle du logique (considéré comme les lois à priori de la pensée) est un problème absurde. Il n'est pas besoin de métaphysique pour expliquer la concordance du cours de la nature avec la législation innée de l'entendement : ce n'est pas d'explication *(Erklärung)* qu'il est besoin, mais d'une simple élucidation *(Aufklärung)* phénoménologique du signifier, du penser et du connaître, ainsi que des idées et des lois qui en découlent. » L'élucidation, c'est le

[1] Nous devons cependant noter ici, entre parenthèses, que si le scientifique ne se pose pas de question sur la possibilité d'un *analytique* des structures à priori considérées comme « ensembles dont la nature n'est pas (encore) spécifiée », il n'en va pas de même de certains philosophes pour qui cet analytique recèlerait, cachée au fond de lui, une faille secrète s'ouvrant sur du non-analytique (empirique, linguistique ?...) d'un caractère encore vague.

domaine de la philosophie, l'explication, celui de la science et ils ne se recouvrent pas [1].

* * *

Pour mieux comprendre la loi, cherchons maintenant son antithèse, l'anti-loi. Ce serait une formule permettant de ne pas déduire, etc. N'est-ce pas la forme de l'histoire ? C'est donc le fait historique. La facticité s'oppose au devenir. La loi ne peut donc pas *donner* le phénomène, mais elle l'engendre dialectiquement comme son contraire pour venir en quelque sorte s'y annihiler. Approfondissons la notion de fait.

Tout fait historique, c'est-à-dire toute information, isolé, choisi n'est perçu comme fait que par une intention de l'observateur, dans le cadre d'une attitude, d'une idéologie latente, car dans la nature, il n'y a pas de fait. L'objectivité en matière d'information est une dangereuse illusion ; en matière de science, elle est un piège. Mme VIRIEUX-REYMOND le montre dans son livre sur l'épistémologie (1966) où elle cite G. BACHELARD : « Au-delà du sujet, au-delà de l'objet immédiat, la science moderne se fonde sur le projet. »

Cela signifie bien que le moi, et par son canal la science, ne peut s'exprimer que dans des *attitudes* prédéterminées par un projet. Le fait vient alors s'intégrer dans la perception totale d'une situation imaginaire qu'il recrée, il cherche à s'englober dans une forme historique complète faite de l'attitude, du projet et de l'intention.

On a pu mesurer que la place laissée à l'attitude à priori dans la perception variait en raison inverse de l'intensité du stimulus : un fait est interprété d'autant plus idéalement qu'il est plus faiblement perçu ; on a l'exemple des soucoupes volantes ! Le fait pur n'existe pas, il doit être créé en l'isolant abstractivement du tout auquel il appartient. Comme l'histoire, la science apparaît comme une idéalisation des phénomènes, une simplification purifiante, une réduction intentionnelle.

Ainsi l'attitude psychologique qui soutient la loi, c'est l'intention de signification et la réalisation d'un symbole archétypique [2]. Par la *réalisation* du symbole, par son « passage à travers le réel », le phénomène se consolide en tant qu'élément actif de notre participation à la nature. La loi sort du réel toute humectée des phénomènes et sa création est un acte de signification qui vient remplir le phénomène.

Signalons en passant un point marquant une certaine évolution de la loi en physique moderne : on la considère comme une affirmation

[1] N'oublions pas cependant que, finalement, le public a besoin d'une interprétation qui sera une élucidation de l'explication ; d'où l'intérêt, justifié, pour les délires scientifiques, les sciences prophétiques, les métaphysiques gnostiques, la science-fiction ou autres parasciences, en un mot pour l'au-delà de la science.

[2] C'est ce que traduit, au cours de la démarche scientifique, le pas de l'*induction*, qui est l'introduction explicite de nos pulsions psychologiques dans le raisonnement logique.

d'impuissance de la forme, « ce qui n'est pas interdit doit arriver ». On est loin de la définition de CLAUDE BERNARD, car dès que les lois sont connues, on se met à attendre l'exception sous la forme de quelque chose qui n'arrive pas et qui ne doit pas arriver. A la forme « *A* donne *B* » on préfère « *A* exclut non-*B* », ce qui correspond à « *A* donne *B* plus peut-être *X* ». La loi doit donc être « ouverte », et il suffit de se rappeler le principe de correspondance de N. BOHR : la nouvelle mécanique doit contenir l'ancienne comme un cas limite.

Résumons cette première partie. La loi est une manifestation de la norme, elle est donc subjective. En tant que formule, elle est langage, c'est donc une création de l'homme pour l'homme. Elle est une mémoire tronquée des faits dans laquelle on a insufflé un souffle de causalité ; elle contient une part d'information obtenue en isolant un petit champ de phénomènes, mais surtout, en complémentarité, elle est signification intentionnelle à tendance archétypique. Elle est une des formes nécessaires à notre évolution en tant que participant à la dialectique du destin et du projet. Les lois de la nature ne sont pas des lois d'essence et la tendance à géométriser ne fait pas de loi, car c'est un rêve. Elle se construit en s'opposant au fait, qui lui aussi est créé dans une attitude et enfin elle est souvent un jugement d'impuissance signe de notre faiblesse.

Nous allons examiner maintenant quelques-uns des derniers refuges de la loi dans la physique moderne. Car, de même que l'ancien concept de *matière* a terminé sa carrière scientifique au profit de conservations plus subtiles, de même la notion de loi finit par s'émietter en une multitude de définitions, de conservations, de violations ou de fluctuations.

* * *

Deux des aspects les plus caractéristiques de la loi en physique nucléaire sont 1° qu'elle se réduit à une *corrélation* statistique, 2° qu'elle décrit des *transitions* entre deux états.

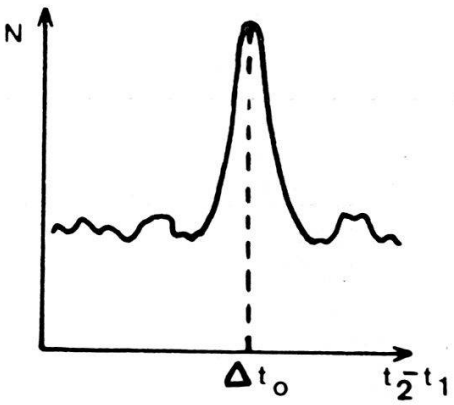

Fig. 1. — Principe d'une corrélation causale statistique. *N* : nombre de cas où P_2 se produit Δt après P_1.

Le principe de corrélation apparaît clairement dans l'expérience hypothétique suivante. Soit un corps *A* émettant une particule *E* au temps t_1 ; on mesure que son niveau d'énergie a baissé, phénomène P_1. Soit un corps *B* absorbant la particule *E* au temps t_2 ; on mesure que son niveau d'énergie s'est élevé, phénomène P_2. Traçons l'histogramme du nombre de cas *N* ou P_2 succède à P_1 après un temps $\Delta t = t_2 - t_1$ (fig. 1). Pour une certaine valeur de Δt, la courbe présente un pic anormal au-dessus des fluctuations statis-

tiques dues au hasard seul. On dit alors qu'il y a un lien causal entre P_2 et P_1, car ils sont statistiquement en corrélation.

Une telle définition de la causalité n'exige plus les anciennes conditions de contiguïté et d'antécédence et encore plus, elle n'exige même pas que Δt soit positif ! Certains physiciens ont proposé qu'une telle loi puisse être encore valide si les particules qui transmettent la cause de A vers B vont plus vite que la lumière ce qui, pour l'instant, n'est pas permis par les lois en vigueur. Alors l'effet précéderait la cause et de telles particules imaginaires ainsi « non einsteiniennes » ont déjà reçu le nom de « tachyons » ; elles viennent s'ajouter à toutes ces particules chimériques proposées et non découvertes que M. GELL-MANN suggère d'englober sous le terme général de « chimérons ». Que l'effet ne puisse précéder la cause est donc un interdit garanti par la Relativité.

Nous considérons alors que la loi, comme résumé des faits, est une corrélation statistique qui demeurera toujours entachée des erreurs *nécessaires* à l'observation. Nécessaires maintenant, car le domaine quantique est justement celui où la loi dépend de l'observation, elle contient à la limite un élément d'erreur qui ne peut être annulé ; comme en conséquence il n'y a plus de loi indépendante, donc extérieure à l'observation, l'erreur devient l'essence de la loi de fait. Mais en plus, nous allons voir que l'observation apporte par son principe même une incertitude dans l'interprétation du fait, donc la loi ne pourra pas prédire le phénomène mieux qu'il ne pourra être observé : elle contient donc une erreur nécessaire.

* * *

Passons rapidement en revue les incertitudes qui interdisent d'atteindre la loi idéale, qui laissent toute loi inexacte au sens rigoureux du terme.

D'abord les relations d'incertitude d'HEISENBERG reliant les erreurs sur deux variables complémentaires toujours liées par l'intermédiaire du temps, comme la position et la vitesse (ou plutôt la quantité de mouvement p) soit $\Delta_x \cdot \Delta_p \geqq h$, h étant la constante de PLANCK, ou comme $\Delta E \cdot \Delta t \geqq h$, signifiant qu'on ne connaît l'énergie qu'au prix d'une incertitude sur le temps où on la mesure. Ainsi la loi ne va prédire que des probabilités de présence, c'est un oracle. Dans la radioactivité, la loi prédit comment l'échantillon dans son ensemble perdra sa radioactivité par décroissance exponentielle, bien qu'on ne puisse pas prédire l'instant exact des micro-explosions des noyaux individuels.

Une autre incertitude, mentionnée par L. BRILLOUIN (1964), est engendrée par l'information qui consomme de la négentropie (entropie négative) et ainsi dégrade le système observateur. Supposons qu'on veuille mesurer une petite distance de 10^{-50} cm (actuellement avec nos accélérateurs on ne sait pas aller au-dessous de 10^{-14} cm). Il faut une

règle à cette dimension et une « lumière » dont la longueur d'onde λ soit de cet ordre de grandeur. Or, on sait depuis DE BROGLIE et BOHR que $E = h\nu = hc/\lambda = 2 \cdot 10^{34}$ CGS va représenter l'énergie minimum pour cette mesure (h = constante de PLANCK, c = vitesse de la lumière dans le vide). Si on veut l'obtenir en désintégrant totalement de la matière m, on écrit $E = mc^2$ d'où $m = 2 \cdot 10^{13}$ gr soit une masse à désintégrer de 20 millions de tonnes ! Même l'annihilation de l'univers ne permettrait de mesurer qu'une distance limitée, non nulle.

Une dernière source d'incertitude, à l'échelle cosmologique, est signalée par MACCREA (1960). Elle est causée par la vitesse finie de la propagation de toute information contenant de l'énergie. Je peux observer deux corps A et B de telle façon que je ne connais pas l'état de B lorsqu'il influence l'état de A dans lequel se trouve A lorsque j'observe A ; car l'influence de B sur A lorsque j'observe est partie avant ma première observation de B. Comme aurait dit LAPLACE, je ne possède pas la connaissance absolue des *conditions initiales* et cela d'autant plus que A et B sont plus éloignés. Si j'attends longtemps, mon extrapolation à posteriori sur l'état de B sera de plus en plus précise, mais elle n'atteindra jamais la vérité absolue qu'asymptotiquement.

Que la loi ne soit qu'une corrélation statistique contenant « ontologiquement » son erreur, voilà une conclusion que nous n'aurions pas pu faire il y a quelques siècles : la relativité, la mécanique quantique, la théorie de l'information ont bouleversé nos rapports avec la nature et nous ont mis en face de nos responsabilités d'observateurs. Tout porte à croire qu'elles n'ont pas fini de nous étonner.

* * *

Nous passerons sur les lois du mouvement (rapports entre force et accélération) pour nous intéresser plus spécialement aux lois de conservation et aux symétries.

C'est une caractéristique de l'infiniment petit de considérer l'événement comme une *transition* entre un état avant et un état après sans chercher le dynamisme propre de la transformation qui nous échappe. On localise le phénomène dans le temps et dans l'espace et on considère les états qui l'entourent comme s'ils étaient des états asymptotiques idéaux.

Soient a_i, b_i ... les paramètres décrivant l'état initial Ψ_i et a_f, b_f, ... ces mêmes paramètres décrivant l'état final Ψ_f après la transition T. On les suppose en nombre fini n et la loi aura la forme $\begin{pmatrix} a_f \\ b_f \\ \vdots \end{pmatrix} = T \begin{pmatrix} a_i \\ b_i \\ \vdots \end{pmatrix}$ où T est une matrice à n lignes et n colonnes que nous appellerons « matrice de transition » au sens littéral du terme (car son sens scientifique est un peu plus subtil). La même description symbolique pourrait s'écrire $\Psi_f = T\Psi_i$

et la connaissance de tous les éléments de la matrice T donnera le phénomène. On comprend là l'importance du calcul matriciel dans la physique moderne.

Cette transition est illustrée par les diagrammes de FEYNMANN en x (distance) et en t (temps) suivant la figure 2. Dans cet exemple, deux particules (ou phénomènes) interagissent localement dans une « boîte noire » dont on ne sait rien ; mais la matrice de transition nous montre qu'il en sort un autre phénomène (ici deux autres particules). En fait, ceci n'est pas nouveau, car nous finissons toujours par trouver une boîte noire qui nous ramène au concept de transition. ARISTOTE disait déjà qu'il y a toujours un premier pas qui est indivisible, c'est celui du *changement de qualité*.

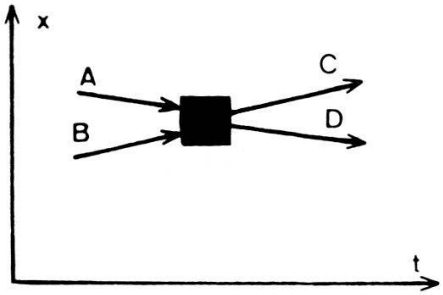

Fig. 2. — Diagramme de FEYNMANN. Un phénomène entre dans une boîte noire, un autre en sort.

On considère comme « conservé » ce qui traverse la matrice de transition sans varier. Mais le plus souvent on laisse de côté tout un pan de la connaissance, celui du changement de qualité. Il y a là un sujet délicat, un peu en marge de la physique officielle : dans la transition, l'énergie totale se conserve, mais elle change de qualité (énergie cinétique peut devenir rayonnement, masse peut devenir vitesse, etc.). Pourrait-on suivre mathématiquement cette variation ? Comme le changement de qualité provoque une émission d'information et qu'en plus il pourrait se décrire par un bilan d'entropie en utilisant le théorème de LIOUVILLE, nous pensons que ni la théorie de l'information, ni la thermodynamique n'ont encore dit leur dernier mot.

Nous devons donc faire attention de ne pas commettre sur l'entropie et sur l'énergie, par suite d'une mauvaise interprétation des concepts, les mêmes erreurs que nos ancêtres ont faites sur la conservation de la « matière », et des philosophes comme BERGSON ou TEILHARD DE CHARDIN, qui se sont parfois laissé aller à des scientismes désuets, auraient dû se méfier du mélange des genres que dénonçait HUSSERL. Pour ce qui est de la matière, sa conservation est remplacée par celle de « l'énergie totale » (énergie cinétique plus énergie équivalente aux masses au repos, ce qui est finalement l'énergie équivalente aux masses en mouvement), et qui traverse donc le phénomène sans varier. Pour ce qui est de l'entropie et même des possibilités de mécanique non hamiltonienne, il faut demeurer encore très prudent et je ne peux malheureusement pas m'étendre ici sur ce sujet, mais je tenais à signaler ce point parfois méconnu des philosophes et dont l'étude nécessite la compréhension du merveilleux outil qu'est le théorème de LIOUVILLE, dont l'importance épistémologique est peut-être mal connue : il décrit une forme de

conservation du mouvement beaucoup plus subtile et plus percutante que la simple conservation de l'énergie.

* * *

Puisque nous ne pouvons pas examiner toutes les lois de conservation qui furent inventées par la mécanique quantique, arrêtons-nous seulement sur la conservation du nombre de fermions, car elle se rattache un peu à la notion de conservation de la matière en ce qu'elle a de solide et d'impénétrable.

On distingue en physique deux sortes de particules : les *fermions*, de spin 1/2 ou demi-entier, comme le proton, le neutron ou l'électron qui forment l'atome et son noyau, et les *bosons*, de spin zéro ou entier, qui sont les quanta des champs, en quelque sorte les agents transmetteurs des forces, comme par exemple le photon pour le champ électromagnétique, le méson pour le champ nucléaire, etc. (Le spin est le moment cinétique intrinsèque d'une particule et mesure en quelque sorte sa rotation sur elle-même.) Les fermions sont un peu comme des bateaux sur un lac, poussés par un vent de bosons. Alors nous avons le principe d'exclusion de PAULI qui propose (nous simplifions) : deux fermions ne peuvent pas être à la fois dans le même état. En gros, cela veut dire que les fermions ne sont pas superposables, qu'ils conservent une espèce d'individualité, comme un espace vital, alors qu'au contraire on peut empiler plusieurs bosons dans le même état (par exemple on pourrait, à quelques nuances près, avoir en un point un champ électrique aussi grand qu'on pourrait le supposer). C'est ce principe qui fait la « matière » du tableau noir en empêchant la craie de passer au travers car les fermions du tableau excluent ceux de la craie.

On propose alors un autre principe : les fermions élémentaires de spin 1/2 se conservent ; leur nombre reste constant sans tenir compte de leur qualité et lorsqu'une particule de spin 1/2 apparaît, une autre disparaît ; lorsque le neutron se désintègre, par exemple, il reste un proton, etc. On généralise ce principe en comptabilisant aussi l'antimatière : un antifermion n'apparaît (ou ne disparaît) qu'accompagné de l'apparition (ou de la disparition) d'un fermion ; ce qui semble se conserver, au moins dans notre voisinage galactique immédiat, c'est la *différence* matière-antimatière, fermions-antifermions. Cette conservation des particules élémentaires de spin 1/2 se subdivisa ensuite en deux principes de conservation plus fins : celui du nombre de *baryons* (neutrons, protons, hypérons et leurs états excités) et celui du nombre de *leptons* (électrons, muons, neutrinos). Par exemple, dans la désintégration du neutron en un proton, un électron et un anti-neutrino suivant $n \rightarrow p + e^- + \bar{\nu}_e$, le baryon « neutron » devient le baryon « proton » et l'apparition du lepton électron négatif est compensée par l'apparition d'un antilepton (l'antineutrino $\bar{\nu}_e$).

Ces premiers exemples nous font déjà sentir deux sortes de lois de conservation : conservation des constantes du mouvement (énergie, quantité de mouvement, moment cinétique, etc.) soumises aux règles de transformation de la Relativité, et conservation des « structures » qui seraient des sortes d'invariants quasi géométriques. Une structure, c'est « un ensemble dont la nature n'est pas spécifiée », c'est une forme pure régie par des lois géométriques comme un hôtel vide dont il ne resterait qu'à remplir les chambres. La loi de fait consiste alors à trouver les choses qui pourraient être reliées entre elles comme les éléments de la structure ; c'est à nouveau la tendance à géométriser. Une structure est une figure géométrique dont les parties sont liées par des rapports nécessaires : à la structure appartient la loi analytique. Si on remplit cette forme avec de la physique, la loi analytique devient loi synthétique et la structure devient modèle et projet.

Alors la loi de conservation considère comme invariant l'*ensemble* des choses qui forment la structure, qui est alors symétrique par rapport à l'échange de ces choses à l'intérieur d'elle-même. C'est pourquoi les lois de symétrie sont un des aspects les plus importants de la notion de conservation.

Considérons la symétrie par rapport à la réflexion dans un miroir, ou l'inversion droite-gauche ; c'est une vue simplifiée de l'opération dite Parité, les vitesses et les positions sont conservées mais les rotations changent de sens. Jusqu'en 1954, on croyait à l'invariance de la nature dans cette inversion (bien que depuis 1848 PASTEUR eût prouvé la dissymétrie moléculaire, dextrogyre et lévogyre, chez le vivant). Les physiciens LEE et YANG proposèrent à cette date qu'il soit possible que cette symétrie ne soit pas conservée exceptionnellement lorsque les interactions faibles seraient présentes, comme par exemple dans la désintégration du neutron. En 1956, Mme WU fit l'expérience cruciale qui confirma que la nature pouvait reconnaître la droite de la gauche : la matrice de transition d'un phénomène n'est pas tout à fait la même pour ce même phénomène imaginé dans un miroir.

La loi d'airain semble violée ; il faut alors vite trouver une loi de conservation plus générale qui, en même temps, contiendra la violation comme une « perturbation ». On voit là la richesse de la méthode moderne ; la violation de la loi est un phénomène attendu, unique et merveilleux, qui permet d'introduire le bout de son pied dans un domaine insoupçonné.

Dans ce cas particulier, on retrouve la symétrie droite-gauche en disant que l'invariance par rapport à l'opération Parité est réalisée si, en même temps, on utilise de l'antimatière. Autrement dit, la matrice de transition demeure la même pour le phénomène vu dans un miroir, mais manipulant de l'antimatière. On retrouve le mythe du miroir, porte de l'empire des ténèbres. On vécut ainsi huit ans, puis un jour cette

nouvelle loi se trouva légèrement violée. On essaie à présent de l'élargir en faisant intervenir la symétrie par rapport à l'inversion du sens du temps. Mais ceci est une autre histoire.

* * *

Cette notion de symétrie et de structure est remarquablement illustrée dans la théorie SU3 dite des symétries unitaires, avec son prolongement SU6. Considérons un espace imaginaire où l'on porte la projection du spin isotopique (I_z) en abscisse, et l'hypercharge (Y) en ordonnée (I_z et Y sont des paramètres qui, parmi d'autres, permettent de décrire les propriétés des particules subnucléaires). Si dans cet espace (fig. 3) nous plaçons les baryons connus de spin 1/2, ils se situent sur un hexagone contenant huit états. Or, on sait empiriquement que, par désintégrations successives, ces particules peuvent se transformer les unes dans les autres suivant une loi à découvrir. On dit alors qu'on est en présence d'un « octet » qui est un peu comme une même particule pouvant se présenter sous huit aspects différents suivant la conjoncture. Les transformations (la matrice de transition) qui font passer d'un état dans l'autre devraient appartenir à un certain groupe de transformations analytiques capables de décrire *géométriquement* les déplacements dans un espace imaginaire à deux dimensions (I_z et Y). Il se trouve que de telles transformations étaient déjà explicitées dans un ancien système algébrique proposé par SOPHUS LIE il y a une centaine d'années, bien avant la découverte des particules élémentaires. Il a suffi d'aller déterrer celles qui semblaient le mieux s'adapter à l'expérience.

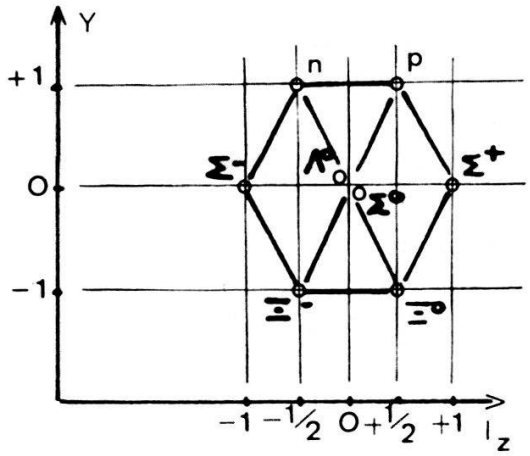

Fig. 3. — Les huit baryons forment un hexagone

Mais ces transformations qui, par exemple, feraient passer du Λ° au proton, décrivent un dynamisme : la désintégration du Λ° en un proton en 10^{-10} sec. dans cet exemple. Dans ce structuralisme, on est donc en face d'une étrange situation où le dynamisme de la vie et de la mort des particules semble être régi par une sorte de structure statique, à caractère géométrique ; la dimension temps s'est complètement géométrisée, d'où des difficultés avec la Relativité.

La structure, dans notre exemple, c'est donc l'ensemble des huit points, et la loi analytique, c'est l'algèbre de LIE qui en définit les symé-

tries ; on la prend comme modèle et on essaie de la remplir avec des particules.

Cet octet pris comme exemple n'est d'ailleurs qu'une partie d'un tout plus vaste comprenant des groupes de 10, de 27, etc., l'ensemble de ces groupes étant à son tour des parties de groupes plus importants comprenant 35, 54 membres, etc. (jusqu'au groupe de rêve qui prendrait tout l'univers dans le filet de sa structure géométrique !). Cette théorie reçut sa première grande justification lors de la découverte *prédite* de la particule Ω comme étant la dixième particule manquante d'un groupe de dix. Comme elle prédit aussi le quark, alors on le cherche.

Il est amusant de noter ici que dans l'espace I_z, Y déjà décrit dans la figure 3, les quarks se présenteraient, s'ils existent, sous trois états figurant les sommets d'un triangle la pointe en bas. Si on suppose alors que toute particule puisse être une combinaison de plusieurs quarks accolés, elle devrait se construire, toujours dans cet espace I_z, Y, par un assemblage de triangles. L'hexagone de la figure 3 est en fait composé de trois triangles pointes en bas (on les trouve en réunissant les points figuratifs $n\,p\,\Lambda^\circ$, $\Sigma^-\,\Sigma^\circ\,\Xi^-$, $\Sigma^\circ\,\Sigma^+\,\Xi^\circ$). C'est alors qu'on repense à PLATON qui, dans le *Timée*, nous décrit l'univers comme un assemblage de triangles élémentaires !

Nous avons donc là un très bel exemple de la démarche épistémologique moderne, car les relations analytiques dans ces structures sont encore plus riches que celles du tableau de MENDÉLÉEV.

Pour terminer, nous devons mentionner la tendance actuelle à présenter les lois de conservation sous la forme de « courant », en analogie avec le courant électrique. Un phénomène apparaît lors de l'interaction de deux, ou plusieurs, courants de particules. Le courant électrique est une charge en mouvement ; or, la charge électrique se conserve. Par analogie toute entité qui se conserve à travers la « boîte noire » de l'interaction localisée peut se représenter par un courant, d'où l'idée de courant baryonique, de courant leptonique, etc. On sent en filigrane la notion psychologique de flux : quelque chose coule comme un fleuve en traversant le phénomène. Dans cette tendance, l'objet qui interagit c'est une trajectoire avec une autre trajectoire. On décrit alors des règles pour la conservation, l'addition... de ces courants d'où une nouvelle « algèbre » des courants.

Prenons comme exemple la désintégration spontanée du neutron $n \rightarrow p + e^- + \bar{\nu}_e$. Grâce à la loi de symétrie CPT (une particule qui s'en va est équivalente à son antiparticule qui arrive en tournant dans l'autre sens), nous pouvons écrire cette réaction $n + \nu_e \rightarrow p + e^-$ (une barre supérieure indique une antiparticule), c'est-à-dire la rencontre du neutron et du neutrino donnant un proton et un électron négatif. Suivant

la figure 4, nous voyons alors un courant « baryonique » qui va du neutron au proton (car ces deux particules sont des baryons, leur nombre se conserve, d'où l'idée d'accoler à chacune un nombre fictif dit « charge baryonique » et valant + 1) et qui interagit « localement » avec un courant « leptonique » qui va du neutrino à l'électron (tous deux sont des leptons, leur nombre se conserve, on estime donc qu'il transporte une « charge » leptonique de + 1).

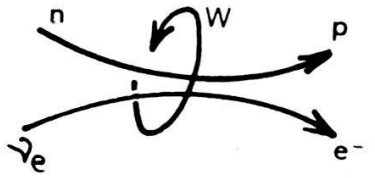

Fig. 4. — La désintégration du neutron considérée comme une interaction entre deux courants.

Y a-t-il un agent qui transporte l'information d'un courant vers l'autre, et qui serait en quelque sorte le quantum de l'interaction dite « faible », responsable de la désintégration du neutron ? Un tel agent envelopperait les deux courants comme le photon enveloppe deux courants électriques en interaction. On suppose, mais encore sans preuve ferme, que cette interaction pourrait se faire par l'échange d'un boson intermédiaire, *W*. Ici, c'est bien l'analogie qui prédit le *W*. [1]

Nous avons donc, au cours d'un rapide survol, aperçu les formes particulières que la loi tend à prendre en physique. Elle ne peut être une loi d'essence, elle se construit sur des corrélations purement statistiques en cherchant des moyennes entre des micro-états fluctuants. Elle contient nécessairement une erreur, à la fois par le phénomène étudié et par le phénomène prédit. Notre attitude devant la Relativité, la mécanique quantique, la théorie de l'information, nous fait accepter cette incertitude quasi ontologique. L'importance des transitions met en relief le formalisme matriciel. Les lois de conservation deviennent plus subtiles et nous nous familiarisons avec les perturbations et les violations. Nous avons vu comment la conservation de la matière devient une formule délicate, faite de la conservation des fermions, de celle de l'énergie totale et du théorème de LIOUVILLE.

Mais nous avons surtout voulu mettre l'accent sur la conservation des structures et sur les lois de symétries qui en découlent. C'est là que la démarche analytico-synthétique se dévoile dans sa grandeur, accompagnée de la tendance (nous pourrions dire de l'espoir) à géométriser. Enfin, nous avons signalé l'importance de l'analogie des courants.

Les notions de conservation et de courant sont liées : dans conservation, il y a l'idée d'une trajectoire qui s'étire, mais d'une trajectoire sans finalité, comme un courant plat et figé. La violation est alors la petite

[1] En introduisant la notion de courant dans une structure, on tente de sauver cette dernière de son statisme figé en la déployant le long du temps, C'est ainsi que l'ensemble des particules formant l'octet SU 3 de la fig. 3 pourrait être considéré comme engendré successivement par des courants de quarks circulant dans l'hexagone.

évolution nécessaire à ce statisme, son « minimum dialectique », car toute loi qui naît doit périr, mais pour ressurgir dans un tout plus vaste qui périra à son tour.

Nous nous trouvons finalement en face d'un dilemme. Par les lois de conservation, le monde qu'on appelle inerte ne semble pas évoluer ; le courant baryonique est la trajectoire infinie d'un baryon venu de l'éternité et s'enfuyant vers l'éternité, et il pourrait transporter un proton dont l'origine, s'il en a une, remonterait à des milliards d'années. N'est-elle pas étrange cette différence entre l'apparente immutabilité des formes élémentaires au moins jusqu'aux macro-molécules, et l'évolution, l'ascension dialectique du vivant ? Mais y a-t-il vraiment différence ? Que cache l'apparente fixité de la loi ? N'est-elle pas un mirage, si nous admettons avec HUSSERL que la Nature ne connaît pas de loi ?

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

BRILLOUIN, L. 1964. — Scientific Uncertainty and Information. Academic Press, New York.

HUSSERL, E. 1963. — Recherches logiques. Presses Universitaires de France, Collection Epiméthée.

MACCREA, W. H. 1960, in *Nature*, vol. 4730.

SCHRÖDINGER, E. 1954. — The Nature and the Greeks. Cambridge University Press.

VIRIEUX-REYMOND, A. 1966. — L'épistémologie. Presses Universitaires de France, Collection Initiation philosophique.

Ouvrages de caractère général

BORN, M. 1949. — The natural Philosophy of Cause and Chance. Clarendon Press, London.

GOUIRAN, R. 1967. — Particules et accélérateurs. Hachette, Paris.

HUTTEN, E. 1966. — The language of modern physics. George Allen and Unwin, London.

REICHENBACH, H. 1956. — The direction of time. University of California Press.

Manuscrit déposé le 11 août 1967.