
De l'essence et de la fonction des formules dans les sciences de la nature

Les sciences de la nature visent une adéquation entre leurs énoncés et la réalité empirique. Elles élaborent des symboles qui s'articulent entre eux pour former des jugements, des propositions, des raisonnements dans une cohérence qui forme des théories, c'est-à-dire une architecture déductive de propositions dont la portée est descriptive ou explicative des phénomènes de la réalité empirique.

La constitution d'une langue symbolique spécifique à chaque science, notamment la physique et la chimie, est repérable à travers l'histoire des sciences. La langue naturelle est évacuée au profit d'un langage symbolique artificiel. Ainsi voit-on la chimie se constituer au XVIII^e siècle par une dénomination exacte des substances et l'abandon d'une terminologie figurative.

Mais si la langue naturelle est réduite progressivement au sein d'une science de la nature, il reste qu'elle ne peut être totalement évacuée, s'il est vrai, selon le théorème de Tarski, qu'un système symbolique de type scientifique ne peut se clore sur lui-même en usant d'un métalangage qui emprunte tous ses moyens au système symbolique qu'il est censé décrire.

Quoi qu'il en soit de ce point à valeur de théorème, c'est dire à minima que de multiples formes langagières peuvent coexister dans une science. Cependant, l'histoire des sciences, – notamment de la physique et de la chimie, – est susceptible de nous montrer l'émergence de formulations typiques des propositions scientifiques qui continuent à coexister avec des formules qui avaient pu paraître hégémoniques, à un stade préscientifique, quant à la formulation du vrai à propos de la réalité empirique.

La formulation du vrai, quelles que soient les époques, se réalise dans des propositions universelles ; au double sens où elles s'appliquent à tous les phénomènes qui relèvent de l'extension de la proposition et qu'elles sont valables en droit pour tous les esprits.

Mais cette formulation générique d'une proposition universelle ne prend pas la même forme au cours d'histoire de la connaissance de la réalité empirique ; elle s'est spécifiée dans de multiples formules, dont la plus typique en science est celle de « loi ». Mais ce type lui-même, par-delà son expression métaphorique de « règle impérative », recouvre des formules non figurées, non métaphoriques, qui témoignent de l'évolution de l'esprit scientifique pour se réorganiser afin de mieux s'adapter aux nouveaux domaines et aux nouvelles échelles de phénomènes qu'il appréhendait ; et ce, en provoquant techniquement, matériellement la nature ; c'est-à-dire, par des opérations susceptibles de nous révéler la fonction ontogénique des formules scientifiques par de-là leur fonction symbolique.

C'est ce que nous nous proposons de voir en suivant principalement l'évolution de la science physique.

I

Une des premières formules de la proposition universelle, due à Aristote, est la formule attributive qui prend la forme d'un jugement liant un sujet et un prédicat ou attribut par une formule : S est P. Cette forme est canonique et les phrases verbales peuvent s'y ramener. Ce qui est adapté à une ontologie qui voit le réel comme fait de substances individuelles auxquelles se rapportent des attributs dont les uns sont essentiels et d'autres accidentels.

Le rôle de la connaissance consiste à repérer les attributs essentiels qui se rapportent à la substance-sujet, support de ces attributs. L'attribut essentiel étant repéré comme inhérent à la substance individuelle, cet attribut peut dès lors s'appliquer extensivement à tous les individus semblables qui appartiennent au même genre. Enfin, au-delà du repérage de l'attribut essentiel, il faut savoir « pourquoi » cet attribut est essentiel et inhérent à la substance individuelle. Sans quoi, il n'y a pas de véritable connaissance.

Mais lorsque Aristote fait la théorie du raisonnement, la syllogistique, il exclut les propositions singulières qui ont pour sujet un individu substantiel. Le sujet grammatical, logique, de la formule attributive désigne soit un « genre », soit un « attribut » : « les hommes sont mortels » ; « le philosophe est homme » ; la proposition attributive est générale et non singulière. Ce qui signifie que vient toujours en position de sujet grammatical un terme qui, lui-même, est un « attribut » ne désignant pas une « substance individuelle » ou « première », mais désignant éventuellement une « substance seconde ».

Cependant, cet « attribut » en position de « sujet » s'inscrit dans une proposition générale dont l'attribut qui lui est affecté relève d'une opération mentale d'induction en extension ou d'induction en compréhension.

Dans le premier cas, on passe par induction des individus ou des espèces, désignés par le terme en position de sujet, à un genre plus large, une classe plus large dans laquelle entrent les individus ou les espèces en question. Dans ce cas, la syllogistique ou la théorie du raisonnement ne fait qu'explicitement une procédure de classification des individus ou des espèces, selon ce qu'on appelle la logique des classes.

Dans le second cas, la procédure d'induction en compréhension saisit le concept lui-même inhérent aux individus ou aux espèces dont il est question sous le premier terme en position de sujet dans une formule attributive et auquel ce concept, à titre d'attribut, de prédicat, va être relié dans cette formule attributive, selon ce que l'on doit bien comprendre comme une relation d'inhérence. Or, précisément, dans ce deuxième cas, l'induction atteint une raison explicative, un principe universel qui, énoncé dans une formule attributive, peut constituer la cheville ouvrière, la proposition médiatrice d'un syllogisme démonstratif à quoi se reconnaît, selon Aristote, le raisonnement scientifique.

On affirme, par exemple, que « les hommes sont mortels » et que « les animaux sont mortels » : la raison, le principe de la première affirmation réside dans l'appréhension du concept « d'animal », qui lui-même comprend la « mortalité » dans sa définition en compréhension, et qui se trouve être inhérent à « l'homme » et aux hommes en tant qu'individus. Aussi bien, selon Aristote, on est en droit de dire : « l'homme est mortel », car «

l'homme est un animal » et que « l'animal est mortel ». Ce qui, exprimé, selon le syllogisme démonstratif, devient avec des propositions universelles affirmatives : « tous les animaux sont mortels » (majeure) ; « or, les hommes sont des animaux » (mineure) ; « donc, tous les hommes sont mortels » (conclusion).

L'ambiguïté de l'induction qui procède par extension ou bien par compréhension est révélatrice du fait que la formule attributive n'est pas elle-même et par elle-même la véritable méthode pour produire la connaissance. Au mieux sa fonction sera celle d'une exposition de la connaissance et non celle d'une production de connaissance. Cette proposition relève, chez Aristote, de « l'intelligence intuitive » (*νοῦς*) qui saisit les raisons des choses, le « pourquoi » de la convenance d'un attribut à une « chose »¹, et qui valent comme « principes » mêmes de la connaissance ; connaissance qui peut ensuite s'exposer dans les formules attributives des syllogismes.

Mais, précisément, si l'intelligence des « causes », en tant qu'intuitive, dépasse la dimension discursive, on peut se demander si tout esprit peut, en droit, la réactualiser et si elle peut adéquatement se dire dans des formules attributives enchaînées syllogistiquement, dans la mesure où l'exposition de la connaissance prend la forme d'une logique des classes qui est propre à classer les concepts selon l'extension, bien plus que selon leur compréhension.

De plus, ériger la formule attributive en forme canonique de la proposition universelle, c'est réduire les phrases verbales, dont les phrases impersonnelles telles que « il pleut », de même que les phrases portant sur les relations telles que : « plus grand que », « fille », « époux de » à la phrase nominale du jugement attributif. Certes, la langue grecque pouvait se prêter à cette réduction, mais ce

« référentiel » est une grille de lecture qui écarte de l'ontologie des faits temporels, des événements singuliers. Ainsi la proposition : « il pleut » rend compte d'un fait qui n'est pas la liaison de deux concepts. De même, « s'il fait jour, il fait clair » est une proposition qui lie deux faits. « Dion se promène » est un fait, un événement. Les mégariques développeront toute une logique sensible aux faits, aux événements, à leurs liens d'implication matérielle et dont la forme canonique ne peut être la forme attributive comme chez Aristote, mais celles des propositions liées par des foncteurs logiques et dont la logique sera développée au XX^e siècle par Russell, sous le nom de calcul des propositions.

Enfin, concernant le contenu des énoncés de connaissance des corps matériels, de la réalité des substances singulières et sensibles, il s'est agi pour Aristote de rendre compte de leur changement, de leur mouvement : ce « sensible commun » à plusieurs sens et qui est constitutif de la nature d'un corps matériels. Or pour connaître la raison du mouvement, du changement d'un corps matériel, – qui recouvre les phénomènes de génération/ corruption, d'augmentation/ diminution, d'altération qualitative, de translations spatiales², il faut connaître les causes constitutives de la nature d'un corps matériel afin de discerner la cause principale du mouvement et de repos de ce même corps matériel.

Par analogie avec l'art humain, Aristote discerne quatre causes : la « cause matérielle », la « cause formelle », la « cause finale » et la « cause efficiente ». Mais il retiendra la « cause formelle » comme la cause du changement de la substance : ainsi, dit-il, « l'énergie agissante

¹ Cf. *Métaphysique*, Z, 17, 1041a 10.

² Cf. *Physique*, V, 2, 226a 23.

(l'entéléchie) de cette forme en puissance »³ dans le corps matériel est au principe de la dynamique intrinsèque, donc naturelle, de ce corps lorsqu'il ne subit pas un mouvement violent contre- nature.

Tous les phénomènes de changements naturels d'un corps matériel sont donc rapportés à une « forme », une « essence » tout à la fois « type » et « idée » du corps matériel en question. Ainsi, du mouvement de la terre, prise comme élément, est déduit son caractère intrinsèquement lourd ; du mouvement du feu, son caractère intrinsèquement léger⁴. De même, les variations qualitatives sensibles des corps matériels (variations du chaud, du froid, du sec, de l'humide) peuvent être couplées et l'on peut en déduire ce qui est, matériellement, de la terre, de l'air, du feu ou de l'eau⁵.

Donc, quelles que soient les formulations explicatives, des variations quantitatives, qualitatives, des translations ou des métamorphoses d'un corps, ces explications restent ordonnées à une « essence » dont la productivité opérante n'est saisie que par analogie avec l'art humain qui, lui-même, « imite » la nature⁶, ce qui ruine d'entrée une détermination de ces phénomènes par des rapports objectifs.

II

La détermination des phénomènes par des rapports objectifs va supposer une rupture par rapport au « référentiel » aristotélicien, selon l'expression de G.G Granger⁷.

Concernant les mouvements ou les changements des corps matériels, il ne s'agira plus de les référer dans leurs variations à quelque essence inhérente au corps, c'est-à-dire à une « entéléchie » ou une « énergie agissante » à saisir intuitivement avant d'être énoncée en compréhension dans une définition attributive et de servir de moyen terme dans la mineure d'une démonstration syllogistique, il s'agira, bien plutôt, de ne retenir des corps que leurs dimensions mesurables.

Selon Galilée, qui suit en cela la géométrie d'Archimède, le mouvement d'un corps exprime le rapport, la relation de ce corps avec le milieu dans lequel il se déplace. Plus précisément, il reconnaît des relations, des rapports entre grandeurs mesurables (distances, vitesse, intervalle de temps) constitutives du mouvement. Les grandeurs entrent en relation les unes avec les autres et elles portent sur un domaine continu et infiniment divisible. Et l'espace abstrait et homogène de la géométrie euclidienne peut rendre compte de ce domaine continu. Il devient réel. Le mouvement s'analysera donc arithmétiquement et géométriquement.

L'essentiel de la rupture de Galilée avec Aristote se trouve là : la nature conçue comme un ensemble de corps en mouvement offrant une prise aux concepts mathématiques, c'est-à-dire, ici, géométriques.

Descartes, de la même façon, contribue à façonner ce « référentiel » inaugural de la science en lui donnant, selon l'expression de G.G Granger, une « forme mécanicienne »⁸.

³ Cf. *Physique*, III, 1, 201a 10.

⁴ Cf. *Du Ciel*, IV, 2, 308b 13

⁵ Cf. *De La génération et de la corruption*, II, 3, 330a 30. Feu : chaud-sec ; eau : froid-humide ; terre : froide-sèche ; air : chaud-humide.

⁶ Cf. *Physique*, II, 8, 199a 15.

⁷ Cf. G. G Granger, *La Vérification*, Odile Jacob, 1992, p. 36.

⁸ Cf. *Sciences et réalité*, Odile Jacob, 2001, p. 144.

Toute matière corporelle est réduite en ses dimensions mesurables de type géométrique ; « longueur, largeur, profondeur »⁹, mais également à ses dimensions de type cinématique et mécanique : « pesanteur », « vitesse » comme dimensions du mouvement¹⁰. C'est dire que les mouvements ou les changements ne relèvent que du transport local d'une matière d'un point à un autre et qu'ils s'offrent au « calcul », aux « démonstrations mathématiques »¹¹.

Avec Galilée et Descartes la nature matérielle est conçue comme un vaste système de mouvements cinématiques et mécaniques de corps figurés géométriquement. Tout phénomène ressortit a priori à ce système qu'on appellera le « mécanisme ». Même la lumière, les couleurs, les odeurs, les sont traduisibles en termes de mouvement, de grandeur et de figures, de dimensions mesurables.

La proposition universelle typique de la « forme mécanicienne » est la formule fonctionnelle, c'est-à-dire celle des équations fonctionnelles de type mathématique qui lient les dimensions mesurables des phénomènes selon des rapports algébriques nécessaires et universels. Formule que Descartes n'a cependant pas toujours visée.

En effet, dans la mesure même où Descartes pouvait se figurer dans son imagination les phénomènes de la nature en termes de figures, de mouvements d'éléments matériels, de substances matérielles, la machine put en être le modèle abstrait. Les choses, les substances, les phénomènes étaient censés être figurables par l'imagination géométrique et mécanique. Ce pourquoi l'organisme vivant devait se réduire précisément à un simple « mécanisme »¹². C'est là ce qu'on appelle le « mécanisme cartésien », qui ouvre droit à de multiples critiques qui dénigrent la science à la faveur de l'identification des visées idéales de la physique avec un tel mécanisme.

Mais le « référentiel » qu'est la « forme mécanicienne » ne réduit pas les phénomènes à des mécanismes de machines : encore une fois, elle vise a priori les phénomènes et les substances dans leurs dimensions mesurables pour les lier algébriquement dans des équations fonctionnelles.

Sur la base de principes fondamentaux du mouvement des corps, tels que ceux de Descartes¹³: 1) principe de conservation de la quantité de mouvement ; 2) principe de réciprocité du mouvement ; 3) principe d'inertie, et ceux de Newton qui y ajoutera le principe de la dynamique selon lequel l'accélération d'une masse est proportionnelle à la force extérieure qui lui est appliquée, – les dimensions mesurables des phénomènes, symbolisées et réduites à un nombre par une mesure, peuvent faire l'objet d'une mathématisation poussée, au sein d'un espace vectoriel¹⁴ qui couple la cinématique du point à la dynamique, et dont l'expression est une équation fonctionnelle reliant algébriquement ces dimensions.

⁹ Cf. *Principes de philosophie*, I, 53.

¹⁰ Cf. *Règles pour la direction de l'esprit*, règle XIV.

¹¹ Cf. *Principes de philosophie*, II, 64.

¹² Cf. *Principes de philosophie*, IV, § 203.

¹³ Cf. *Le Monde ou traité de la lumière*, Chap. VIII.

¹⁴ Un espace vectoriel est un espace de vecteurs liés à un « corps » dont les nombres opérateurs (si ces nombres sont des réels on les appelle des scalaires) peuvent multiplier les vecteurs qui, eux-mêmes, s'additionnent ; et ce, de telle sorte que les vecteurs se combinent linéairement : $a\vec{v} + b\vec{w} = c\vec{z}$, pour donner d'autres vecteurs appartenant à cet espace.

Ces « formules fonctionnelles » construites par l'esprit scientifique ont été appelées des « lois de la nature », signifiant métaphoriquement que les phénomènes de la nature sont sinon soumis à des

« règles impératives », du moins sont-ils constitués de telle sorte que leurs dimensions mesurables sont dans des relations nécessaires et universelles et dont la garantie objective, dans et par une vérification expérimentale, se passe d'une référence théologique à la volonté de Dieu garant d'un ordre de la nature et de la portée ontologique de la méthode scientifique. Dit autrement : la méthode scientifique, s'autonomisant par rapport à toute théologie, les « lois de la nature » devenaient simplement des formules scientifiquement construites par l'esprit scientifique, que l'on pouvait continuer à appeler « lois » si on le désirait, mais en un sens strictement métaphorique.

III

On vient donc de poser comme type de la proposition universelle des sciences de la nature, notamment de la physique, la « formule fonctionnelle » ou la « loi fonctionnelle ». Mais n'est-ce pas négliger ce qu'on appelle les « lois causales » ?

Les « lois causales » ou les « formules causales » se distinguent des « formules fonctionnelles » en ce qu'elles ne sont pas des expressions algébriques des relations entre les dimensions mesurables d'un phénomène, mais l'expression d'une relation entre deux phénomènes dont l'un est posé comme cause antécédente dans le temps d'un autre phénomène, posé dans le temps et l'espace comme effet conséquent du phénomène antécédent.

De telles formules existent dans la physique ou la chimie, mais elles ne sont pas mises en exergue dans les chapitres de physique ou de chimie comme étant des « lois ». Ce que l'on y retient, à titre de

lois, ce sont les lois fonctionnelles. Et si des formules causales interviennent c'est, le plus souvent, pour affirmer la liaison entre variables de ces mêmes lois fonctionnelles comme étant un lien, une connexion nécessaire entre une variable posée comme condition antécédente, antérieure, d'une autre variable posée comme conséquence conditionnée, postérieure. Mais, ce faisant, elle exprime comme relation chronologique, temporelle, ce qui est inscrit dans une relation mathématique dont la forme logicomathématique invariante échappe au temps et lui confère une modalité apodictique qui déborde toute expérience actuelle.

Ainsi, à titre d'exemple, que l'on pourrait multiplier à l'envi, on pourra trouver dans un livre de physique que, si on fait varier la température d'un gaz, celui-ci va augmenter sa pression et prendre un volume plus grand que son volume antécédent. Les variations des variables sont corrélatives et s'expriment dans une fonction mathématique ; mais, dans une expression causale, les liens entre variables s'expriment selon une implication matérielle d'ordre chronologique.

À défaut d'être une expression chronologique de relations de variables dont la forme légale relève d'une loi fonctionnelle, la loi causale a un statut épistémologique problématique.

En effet, si le lien causal est de l'ordre du constat empirique d'une conjonction constante dans l'ordre chronologique entre deux phénomènes, et que, comme le soulignent

Malebranche, on ne peut prouver empiriquement ou a priori un lien analytique ou une action transitive efficace entre le phénomène en position de cause et le phénomène en position d'effet, alors l'affirmation que cette conjonction constante est une connexion nécessaire et universelle de l'ordre de la nature, ne repose, comme le soulignait Hume, que sur la tendance de l'imagination, fondée sur la seule habitude, à se figurer que l'expérience à venir ne contredira pas l'expérience présente et passée.

Le caractère légal de la relation causale s'évanouit et ne repose ultimement que sur le pari métaphysique d'un ordre de la nature dans les séries chronologiques de ses manifestations phénoménales.

Kant, au lieu de faire du lien causal, un lien analytique a priori ou un lien synthétique purement empirique, dont la garantie ontologique postule un ordre en soi de la nature, harmonisé avec la succession des idées dans l'esprit¹⁵, va poser ce lien causal comme une des exigences a priori de l'esprit pour synthétiser les phénomènes spatio-temporels selon une liaison causale. Mais si, ce faisant, le principe épistémologique devenait universel à tout esprit et en même temps nécessaire pour organiser la représentation des phénomènes selon un ordre cohérent, il reste que les « lois causales » étaient bien considérées comme le type même de lois scientifiques avec une modalité réelle, assertorique lorsque celles-ci étaient vérifiées expérimentalement, mais, faiblesse insigne, sans atteindre la modalité apodictique des relations fonctionnelles qui présentent des formes, des structures mathématiques invariables et qui recouvrent de manière appropriée la définition de la loi empirique de type scientifique.

Les prétentions des expressions causales, assurant d'un lien constant, universel et réel entre phénomènes, à être des « lois » universelles et nécessaires ont cédé la place aux « lois fonctionnelles », seules véritablement scientifiques. Rétrospectivement, à la lumière du « mathématisme » des sciences, les « lois causales » apparaissent quasiment comme d'ordre préscientifique.

Mais, dira-t-on, l'usage de la causalité, de la notion de cause n'est-il pas opérant dans la physique et la chimie, même si l'on accorde que la notion de « loi causale » est inappropriée au progrès des sciences de la nature ?

Sans doute le terme de cause ou de causalité est-il préservé, mais, quand il ne désigne pas la projection sur un plan chronologique d'une relation fonctionnelle entre variables, ou bien encore le rapport entre une variable et l'instrument de mesure capturant la variable dans un nombre, il désigne un principe rationnel à partir duquel on peut déduire un certain nombre de lois fonctionnelles et dont le scientifique pense qu'il n'a rien de « métaphysique », contrairement à ce que pensait A. Comte¹⁶, et qu'il pourra être investi par les techniques expérimentales.

On pourra, bien sûr, de manière exemplaire, citer la théorie de la gravitation universelle explicative des lois de Kepler et de la loi de chute des corps de Galilée. Explicative, en un premier sens, où des lois de la gravitation universelle peuvent se déduire démonstrativement les lois des orbites des planètes autour du soleil et la loi de chute des corps. Et explicative, en un deuxième sens, où le principe d'attraction entre les corps explique, à titre de cause, la

¹⁵ Cf. Hume, *Essai sur l'entendement humain*, V, II.

¹⁶ Cf. *Cours de philosophie positive*, 1^{ère} leçon.

dynamique des corps célestes et des corps matériels dans leur chute sur terre. Deuxième sens, que l'on trouve également, par exemple, dans la théorie cinétique des gaz qui explique les lois des gaz parfaits par l'hypothèse de la structure moléculaire des gaz sous-jacente aux lois phénoménologiques du niveau macroscopique.

La « cause », entendue comme « raison explicative » et « démonstrative » ne s'exprime cependant pas dans une formule causale recouvrant une liaison chronologique d'implication matérielle entre un antécédent conditionnant et un conséquent conditionné, mais elle s'exprime dans une chaîne de raisonnements démonstratifs ; c'est-à-dire, de relations déductives et démonstratives entre une « raison », un « principe rationnel » et ses conséquences. Ce pourquoi, on ne trouvera pas une seule et unique formule précise résumant cette syntaxe théorique qui, pour être scientifique, est de type logicomathématique.

IV

La légalité fonctionnelle donc, bien plus que la relation causale et la relation attributive, constitue la formule typique, emblématique des sciences hautement développées que sont la physique et la chimie. Et lorsqu'on parle du « principe du déterminisme » comme principe épistémologique régulateur de l'esprit scientifique, il faut entendre non pas exclusivement la possibilité en droit d'exprimer la détermination des phénomènes selon des formules « causales », mais également l'expression des phénomènes dans leurs dimensions internes selon des « lois fonctionnelles ». De ce point de vue, la formulation du principe du déterminisme faite par Laplace¹⁷ recèle une ambivalence insuffisamment aperçue ; car

« l'Intelligence » susceptible de connaître le passé, le présent et l'avenir de l'ensemble de la nature dans ses détails est considérée non seulement comme pouvant connaître toutes les forces et tous les êtres de la nature dans leur composition et leurs rapports, mais également comme pouvant, par l'analyse, embrasser « dans la même formule les mouvements des plus grands corps de l'univers et ceux du plus légers atomes ». Laplace envisage donc une formule fonctionnelle mathématique, telle que celle de la gravitation universelle de Newton, et qui permette, à partir de son invariance structurelle, de fonctionner comme un principe assurant démonstrativement la représentation de l'avenir, du présent et du passé de l'ensemble de la nature jusque dans ses détails les plus infimes.

Le « principe du déterminisme » est donc à entendre comme un principe épistémologique de « légalité » de la nature qui recouvre les formulations causales de l'implication matérielle et les formules fonctionnelles, les lois fonctionnelles des phénomènes. Et, plus encore, si les lois fonctionnelles se hiérarchisent et s'unifient dans une théorie unitaire qui embrasse la totalité de la nature, alors ce principe recouvre également la « loi fonctionnelle fondamentale », à titre de « cause » ou de « raison explicative » de la totalité de la nature, dans son devenir compris, et telle que pourrait la saisir une Intelligence suprême.

Ce qui signifie que le « principe du déterminisme » recouvre toutes les lois fonctionnelles qui valent, à un moment donné du progrès scientifique, comme « cause » ou « raison » explicative de lois fonctionnelles subordonnées.

La formule qu'est la loi fonctionnelle, $y = f(x)$, est le type même de la loi scientifique qui vaut comme genre en ce que les fonctions mathématiques que l'on trouve dans la physique et la chimie sont de divers types spécifiant ce genre : équation linéaire, fonction

¹⁷ Cf. *Essai philosophique sur le calcul des probabilités*, 1814.

quadratique, exponentielle, logarithmique, équation différentielle, équation aux dérivées partielles, équation sinusoïdale ou circulaire.

Ces équations mathématiques donnent en compréhension la « raison » même des rapports entre variables constitutives d'un phénomène. Et cette « raison » logicomathématique se substitue à la chronologie des relations de cause à effet ; de telle sorte que si le temps intervient, c'est comme simple variable dans l'équation.

L'émergence de ces lois dans l'histoire des sciences physiques fait apparaître des formes de plus en plus complexes.

En 1937, l'astronome Henri Mineur¹⁸, que cite Robert Blanché¹⁹, voit assez justement cette complexification.

Au XVII^e siècle les lois de type galiléen sont des équations linéaires et des équations quadratiques. Puis viennent les lois de Newton, fondateur de la dynamique, qui sont des équations différentielles permettant d'établir la relation entre un état du système entre deux instants proches l'un de l'autre ; ensuite, les lois de type laplacien ou maxwellien qui sont des équations aux dérivées partielles et qui permettent de saisir l'évolution d'un champ électrique ou magnétique dans l'espace et le temps, au-delà de la proximité infinitésimale propre aux équations différentielles. De telles équations permettent également de rendre compte de la propagation du son, de la diffusion de chaleur dans toutes les dimensions de l'espace, c'est-à-dire, respectivement, « l'équation de propagation » ou « équation d'onde » et « l'équation de la diffusion ». Puis viennent, au XIX^e siècle les lois de type einsteinien qui permettent de calculer un invariant et de maintenir invariante les lois électromagnétiques et mécaniques quel que soit le « référentiel » galiléen ou accéléré dans lequel on fait la mesure, ce qui fait appel aux formules d'un groupe de transformations assorti du postulat de l'invariance de la vitesse de la lumière ; et, pour la Relativité générale, cela fait appel aux formules du calcul tensoriel.

Enfin, ce sont les lois quantiques qui apparaissent : équations de Schrödinger, matrice de Heisenberg, principe d'incertitude, et qui, sans que leur équation soit mathématiquement plus complexe, revêtent un caractère probabilitaire, une forme probabilitaire qui les distinguent des lois initiées par la « mise en forme mécanicienne », selon l'expression de G. G Granger, en ce que ces dernières, dont nous avons parlé jusqu'ici, sont des lois dites « strictes », puisqu'elles n'introduisent pas un calcul des probabilités à propos de l'objet sur lequel elle porte.

V

Une partition doit être faite au sein du genre « loi fonctionnelle » entre les « lois strictes » et les « lois probabilitaires » dont l'émergence, en physique, s'est produite au XIX^e siècle, bien avant les « lois quantiques », dont la forme probabilitaire devra elle-même être précisée pour la distinguer épistémologiquement de la forme probabilitaire des lois probabilitaires antérieures.

Mais avant d'aborder ces deux branches de la forme probabilitaire, il faut bien préciser que lorsqu'on parle d'une « loi probabilitaire » on ne qualifie pas la modalité de la loi en question selon son degré de confirmation objective, ou le degré de croyance qui

¹⁸ Cf. La loi en mécanique et en astronomie, in *Science et Loi*, 5^e semaine internationale de synthèse.

¹⁹ Cf. L'idée de loi dans la physique moderne et contemporaine, *Cahiers rationalistes*, mars 1970, n° 272.

l'accompagne, mais on désigne l'objet même de ces lois comme relevant d'un calcul de probabilité ; en d'autres termes, la probabilité apparaît ici comme une mise en forme probabiliste des phénomènes de la nature. La probabilité est une détermination objective, calculable.

La première branche des lois probabilitaires apparaît en physique au XIX^e siècle.

Elle apparaît avec la théorie cinétique des gaz parfaits²⁰ pour rendre compte de la loi phénoménologique des gaz qui synthétise la loi de Boyle-Mariotte ($P V = K^{ste}$) ; la loi de Charles ($V = K^{ste}$) et la loi de Gay-Lussac ($P = K^{ste}$) dans la formule $P V = K^{ste}$. Mais dès lors que l'on constate, – d'une part, que le produit de la pression (P) et du volume (V) est égal à la masse du gaz multiplié par un coefficient linéaire constant, et que, d'autre part, la théorie cinétique postule que le gaz est constitué de moles qui contiennent toujours le même nombre de molécules, – moles dont on peut déterminer le nombre dans une masse donnée de gaz en connaissant l'unité de masse atomique ou les unités de masse atomique d'une masse moléculaire du gaz en question, puisque la valeur numérique de la mole est la même que celle de la masse moléculaire de ce gaz, – alors, sur la base de ce constat, disais-je, la loi des gaz parfaits peut être exprimée dans la formule $P V = n R T$, où n est le nombre de moles et R la constante universelle des gaz parfaits.

Boltzmann s'appuyant sur le nombre d'Avogadro ($N_a = 6,022 \times 10^{23}$), donnant le nombre de molécules par moles, peut réécrire²¹ la formule avec la constante dite de Boltzmann $K_B = \frac{R}{N_a}$ qui est une des constantes fondamentales de la nature ; ce qui donne : $P V = N K_B T$, dans laquelle N est le nombre de molécules constitutive du gaz ; P la pression ; V le volume et T la température.

Mais, pour bien comprendre en quoi ces lois sont probabilitaires, il faut les lier à l'énergie cinétique des particules composant le gaz, c'est-à-dire leur masse, leur vitesse ainsi que les déplacements de la particule avec ses degrés de liberté au sein d'une enceinte cylindrique équipée d'un piston placé à une certaine distance du fond du cylindre et ayant une surface déterminée.

Boltzmann et Maxwell ont pu, en reprenant les travaux de Bernoulli de 1738, expliquer la pression, la température, le volume et leurs relations à partir des mouvements et des chocs des multiples particules d'un gaz parfait. Pour faciliter les calculs, ils ont considéré les particules comme des petites sphères et les chocs sur les parois comme étant élastiques. Ils ont simplifié les calculs en éliminant les chocs entre particules et considéré que les particules ont la même probabilité de se déplacer dans toutes les directions. Ainsi la loi de Boyle-Mariotte ($P V = K^{ste}$) peut être écrite $P V = \frac{1}{3} N m \bar{v}^2$; c'est-à-dire : en faisant intervenir le nombre des particules N et leur énergie cinétique moyenne \bar{v} , on détermine la pression d'un gaz parfait dans un volume fixé. De même, la température de ce gaz peut être déterminée comme proportionnelle à la moyenne de l'énergie cinétique de translation de ses molécules.

²⁰ « Parfaits » en ce sens que le comportement des gaz est décrit en respectant les limites fixées par des conditions bien définies : il faut éviter les hautes densités, les hautes pressions et les basses températures près du point de liquéfaction.

²¹ $N = N_a \rightarrow n = N/N_a$; et $P V = n R T \rightarrow P V = N/N_a R T$. Et donc $K_B = R/N_a$.

Pour démontrer ces lois, à partir de la cinétique des molécules, il faut calculer, à une température donnée du gaz, les distributions des vitesses les plus probables des molécules. Cette distribution de Maxwell-Boltzmann, qui représente le spectre le plus probable des vitesses moléculaires du gaz en question, est au cœur des lois des gaz parfaits qui sont donc l'expression de probabilités objectives des vitesses et du déplacement des molécules.

Le pas supplémentaire, qui consiste à prendre en considération les collisions électromagnétiques des molécules entre elles, conduit à la mécanique statistique de Gibbs.

Mais ce ne sont pas seulement les lois des gaz parfaits dont Boltzmann a pu rendre compte à partir de régularités statistiques fondées sur des probabilités de particules sous-jacentes aux phénomènes visibles, mais également il a rendu compte, sur les mêmes bases, du second principe thermodynamique.

Le premier principe de la thermodynamique pose qu'un système isolé conserve son énergie. Ce qui signifie que l'énergie d'un système ne peut être détruite, mais éventuellement transférée vers un autre système. Ce transfert s'opère par la chaleur, le travail, l'énergie potentielle électrique, gravitationnelle, cinétique, par exemple.

Le deuxième principe de la thermodynamique pose, d'abord, que la chaleur s'écoule spontanément d'un corps chaud vers un corps froid, de manière irréversible. Généralisé ce second principe pose que l'énergie d'un système se dégrade qualitativement, et non quantitativement ; ce qui serait contradictoire du premier principe. En d'autres termes, les transformations énergétiques d'un système le conduisent à un état dans lequel les transferts énergétiques internes au système deviennent improbables. La mesure de la dégradation qualitative de l'énergie d'un système s'appelle l'entropie, symbolisée par S.

Or Boltzmann, en 1877, a réussi à lier la propriété d'un système isolé à l'échelle macroscopique, dont on peut calculer la variation d'entropie, avec les configurations probables du système à l'échelle microscopique ; c'est-à-dire, atomiques ou moléculaires et qui peuvent correspondre à l'état macroscopique du système.

Ainsi, pour prendre un exemple simple, si l'état macroscopique d'un système est constitué de 4 molécules que l'on peut répartir dans 2 cellules spatiales, alors 5 types de configurations de répartitions de ces molécules dans ces cellules spatiales sont possibles. La configuration présentant la dispersion moléculaire la plus grande, (en l'occurrence, pour l'exemple qui nous occupe : 2 molécules dans chaque cellule spatiale ; ce qui donne, ici, 6 cas possibles de répartition des 4 molécules individualisées et identifiées pour constituer la configuration la plus dispersée), correspond à l'augmentation la plus grande de la variation d'entropie.

La relation entre l'entropie et le nombre des états microscopiques permettant de réaliser l'état macroscopique observé est : $S = K_B \ln W$. K_B étant la constante de Boltzmann et W étant précisément le nombre de ces états microscopiques dont la configuration intrinsèque réalise l'entropie mesurée du système macroscopique. Et si la fonction est logarithmique cela provient du fait que les probabilités se multiplient entre elles, alors que les entropies s'additionnent et que, précisément, le logarithme de probabilités multipliées entre elles est égal à la somme des logarithmes de ces deux mêmes probabilités : $\ln a.b = \ln a + \ln b$.

La généralisation de cette procédure, en liant le calcul des probabilités des configurations des particules dans des cellules d' « espace de configuration »²² avec les propriétés mécaniques des particules en interaction entre elles, avec les limites matérielles du système et les forces agissant sur le système, donnera la mécanique statistique de Gibbs dont le but est de calculer la probabilité maximale de certaines configurations de particules pouvant conduire à un état macroscopique observé ou simplement possible.

La théorie cinétique des gaz devient un cas spécial de la mécanique statistique qui est généralisée à des solides et qui recouvre les lois de la thermodynamique et le second principe ainsi que les lois des gaz parfaits.

Ces lois n'apparaissent plus comme des lois « strictes », c'est-à-dire telles que la relation fonctionnelle entre variables, en quoi consiste la loi, exclue, comme impossible, que les rapports de détermination entre variables qu'elle définit ne soit pas vérifiés.

Les lois énoncent et recouvrent des probabilités, des régularités statistiques, portant sur des configurations globales, des états macroscopiques dont le calcul donne un chiffre suffisamment proche de 1 pour que l'on tienne ces lois pour certaines ; et, une exception à la loi pour très improbable.

De telles lois pouvaient donc être considérées comme des lois ayant une forme probabilitaire prenant place à côté de formes fonctionnelles strictes, sans menacer épistémologiquement celles-ci dans leur modalité « stricte », puisque les « raisons explicatives » des fonctions à forme probabilitaire faisaient elles-mêmes appel à des particules microphysiques répondant à des déterminations fonctionnelles strictes.

Ainsi, en thermodynamique, l'usage des probabilités est appelé par l'ignorance pratique de la singularité des trajectoires des particules moléculaires, mais on ne met pas en doute le fait que ces trajectoires puissent être, en droit, l'objet de lois fonctionnelles strictes si l'on pouvait suivre chacune d'entre elles dans leurs interactions entre elles et avec les parois du système au sein duquel elles se meuvent. Précisément, à défaut, on envisage leur répartition dans des cellules spatiales recouvrant le volume du gaz et dont le nombre de configurations semblables rapportées au nombre de configurations possibles donnent la probabilité de la configuration d'ensemble du gaz en question. Ce pourquoi, malgré leur apparence « stricte », les lois des « gaz parfaits » peuvent être considérés comme des lois statistiques ou probabilitaires puisqu'elles expriment les plus grandes fréquences statistiques de configuration spatiale et dynamique des particules du gaz.

Le soupçon que le principe épistémologique de légalité stricte ou « principe du déterminisme » puisse ne pas s'appliquer à tout un domaine de la réalité survient lors de la conquête scientifique du domaine de l'atome et de ses constituants : le domaine donc de la microphysique.

L'électron, de même que toute particule, se dérobe à la connaissance exacte de son état dans toutes ses dimensions conjuguées de position et de quantité de mouvement, de telle sorte qu'on ne peut dire si sa trajectoire répond à une légalité stricte, puisque dans certaines cellules de l'espace, on ne peut suivre cette trajectoire, et que, tout au plus, on ne peut indiquer que sa probabilité de présence.

²² « Espace abstrait » dans lequel les états des particules possèdent de nombreuses dimensions.

À quoi il faut ajouter, pour bien préciser cette défection d'une particule microphysique à l'emprise de la connaissance certaine de son état, – et par là-même renforcer le soupçon sur la validité épistémologique du principe de légalité stricte au niveau microphysique, – que cette indétermination sur les grandeurs conjuguées de l'état d'une particule, était elle-même déterminée dans une loi comme étant, en fait, une limite de la réalité physique objectivement indépassable, de telle sorte que le postulat même d'une légalité stricte de la trajectoire d'une particule pouvait apparaître comme relevant d'une exigence ontologique a priori, d'un pari ontologique dont les déductions expérimentales, notamment le paradoxe EPR (Podolski, Rosen, Einstein) et les inégalités de Bell, ont été d'ailleurs démenties par les expériences scientifiques d'A. Aspect et son équipe en 1981.

Reprenons rapidement ce point pour l'expliquer et lui conférer une plus grande intelligibilité.

Alors que Schrödinger donne en 1926 une fonction d'onde qui décrit l'électron autour du noyau de l'atome (notamment sa distance par rapport au noyau, son spectre d'émission lorsqu'il change de niveau d'énergie, l'amplitude de vibration de son onde autour du noyau), Heisenberg en 1925, non seulement se passe de tout recours à la représentation d'une onde pour rendre compte du spectre d'émission et de l'intensité de la lumière émise par les électrons de l'atome en mettant en œuvre des « tableaux de matrices »²³, mais encore, apercevant que le calcul matriciel des vitesses par les positions des électrons n'est pas commutatif, il en déduit la signification : si l'on a une précision quant à la vitesse ou la quantité de mouvement d'une particule, alors on perd une précision quant à sa position, et inversement. Ce qui a été appelé le « principe d'incertitude » (1927), et qui est une formule simple de détermination d'une « indétermination » indépassable, objective ($\Delta x \cdot \Delta p \geq h/4\pi$), puisque toute intervention pour connaître avec précision la position d'une particule implique une interaction physique de l'instrument de mesure qui va troubler sa quantité de mouvement ; et que, si l'on veut préciser sa quantité de mouvement alors on peut l'enregistrer, mais c'est au prix de ne pas savoir exactement où se situe la particule ; et l'on n'est pas surpris de voir que la formule d'indétermination fait apparaître le « quantum d'action » h (constante de Planck) qui correspond à l'unité minimale (le quantum minimal) selon lequel varie l'énergie d'un électron lorsqu'il passe d'une couche atomique à une autre de moindre énergie et que s'ensuit une émission de lumière. Dès qu'on entre dans cette zone microphysique dans laquelle joue le « quantum d'action », alors l'indétermination des mesures sur les dimensions conjuguées de l'état d'une particule est exactement déterminable par les inégalités de Heisenberg.

Le comportement de la particule ne répond plus à une légalité stricte. Et arguer de l'équation de Schrödinger pour affirmer que l'équation d'onde permet de suivre dans un ordre infinitésimal la trajectoire d'une particule, c'est se méprendre sur ce que peut désigner l'équation quant à cette trajectoire ; à savoir : les seules probabilités de présence de la particule dans une zone de l'espace dont les limites sont fonction de l'amplitude de la fonction d'onde ; fonction d'onde qui est à comprendre comme recouvrant une superposition d'ondes multiples, de telle sorte que la précision quant à la position de la particule dans l'espace produit une réduction de toutes ces superpositions ou « réduction du paquet d'ondes », mais

²³ Lignes et colonnes de résultats de mesure portant sur les fréquences de l'émission de lumière par un atome, ainsi que sur la vitesse et sur la position des électrons par rapport au noyau de cet atome.

avec une indétermination corrélative de la quantité de mouvement de la particule, puisque l'usage des photons de lumière pour connaître la position altère cette quantité de mouvement.

Moyennant cette compréhension de l'équation de Schrödinger, l'approche ondulatoire de la particule pouvait apparaître non comme contradictoire de l'approche corpusculaire, mais bien plutôt comme « complémentaire ». Selon ce « principe de complémentarité », comme le nomma Niels Bohr en 1927, des particules peuvent donc apparaître expérimentalement, autant sous forme « d'ondes » (comme on le voit dans les célèbres expériences des fentes de Young) ou bien sous forme de « corpuscule » lorsqu'on élimine une des fentes ou encore lorsqu'on ralentit les particules et que l'on intervient pour connaître exactement la fente par laquelle elles sont passées. La mesure même de la position réduit le « paquet d'ondes » et annule le phénomène d'interférence propres aux ondes.

Quoi qu'il en soit, et sans aller plus avant dans ce « principe de complémentarité », il faut bien constater au niveau des particules une absence de légalité stricte ou de détermination stricte, ce que certains comme Bohr considèrent comme une disparition des « lois causales » strictes²⁴, puisque, encore une fois, la mesure de la position d'une particule située entre deux valeurs n'offre qu'une probabilité, de même que la mesure de la quantité de mouvement de la même particule, n'offre qu'une probabilité située entre deux valeurs et que le produit de l'imprécision de ces deux mesures ne peut être en deçà de l'ordre même du « quantum d'action » de Planck.

L'absence de légalité stricte au niveau microscopique, dont témoigne le recours aux probabilités, ne va pas sans poser un certain nombre de problèmes, à la fois épistémologiques et ontologiques.

Premier problème : est-il certain que l'indétermination au niveau microscopique soit indépassable ? le « principe du déterminisme », de légalité stricte, interprétée comme loi de type causal, à la manière de Simon de Laplace, doit-il, au niveau microphysique, être définitivement abandonné au profit du « principe d'indétermination » qui fut appelé également « principe d'indéterminisme » ?

Einstein, par exemple, ne le pensait pas. Il postulait que le principe d'indétermination et le recours aux probabilités au niveau microphysique n'était que provisoire et que l'on pourrait découvrir une détermination stricte de l'état d'un système qu'est une particule à un niveau plus fin que celui du

« quantum d'action ». La « forme mécanicienne » avec des équations aux dérivées partielles rendant compte de la continuité d'une trajectoire dans l'espace et le temps devant être, en droit, toujours possible dans l'ordre microphysique.

Or, dans l'ordre microphysique dans lequel joue le « quantum d'action » de Planck, on ne peut déterminer que la probabilité de présence d'une particule dans une zone de l'espace et on ne peut pas affirmer que sa trajectoire est continue : tout comme on ignore la trajectoire d'un électron lorsqu'il saute d'un niveau d'énergie à un autre dans un atome, on ignore, comme le montre l'expérience des fentes de Young, la trajectoire d'une particule lorsque les

²⁴ À dire vrai Niels Bohr écrit : « Ce postulat oblige à renoncer à une description à la fois causale et spatiotemporelle des phénomènes atomiques » (cf. Conférence de juin 1925, La Théorie atomique et la description des phénomènes, trad. A. Legros et L. Rosenfeld, Paris, Gauthiers-Villars, 1932, p. 50-54). Bohr distingue, dans ses propres termes, « l'observation » spatiotemporelle de la « définition » causale.

deux fentes sont ouvertes et que sur l'écran, recevant l'impact de chaque particule envoyée à partir d'une même source placée avant les fentes, se forme des franges d'interférence de telle sorte qu'il semble que la particule soit une onde répartie dans l'espace et qui, plus est, interfère avec elle-même. Ce qui est apparemment contradictoire du caractère ponctuel de l'état spatiotemporel d'un corpuscule.

Einstein, contre Bohr et Heisenberg, refusera de rompre, au niveau microphysique, avec l'idée d'une trajectoire continue et intrinsèquement déterminée d'une particule. Il refusera qu'une particule, considérée comme une fonction d'onde recouvrant un « paquet d'ondes » dans un volume spatial, précisément circonscrit par la fonction, puisse être située simultanément en de multiples cellules de l'espace, selon diverses probabilités, et que cette « particule » conçue sous l'aspect d'une onde n'obtienne une position déterminée et un aspect corpusculaire que dans un dispositif de mesure réduisant le « paquet d'ondes » et, qu'avant cela, elle puisse interférer avec elle-même et engendrer des interférences dont les franges sont constatables sur un écran, comme dans l'expérience des fentes de Young.

Pour prouver le caractère « incomplet » de la mécanique quantique, Einstein, Podolski et Rosen proposèrent, sous forme d'expérience de pensée, un paradoxe connu sous le nom de paradoxe EPR.

En 1935, Einstein prend acte du fait que si on considère une seule particule libre, se déplaçant dans le vide, il est difficile d'affirmer, qu'avant de mesurer sa position et sa quantité de mouvement, l'état de la particule est parfaitement déterminé. Mais si on prend en compte deux particules ayant eu une interaction dans le passé, alors ces deux particules devraient avoir des déterminations fixées de telle sorte que de la mesure de la détermination en question sur une particule, on puisse déduire ce que sera la détermination de l'autre particule.

En revanche, selon la mécanique quantique, ce qui est bien sûr paradoxal, si deux particules ont été en interaction elles restent « intriquées » l'une l'autre, mais de telle sorte que la détermination d'une particule ne se fixe qu'au moment de la mesure et que, instantanément, quelle que soit la distance séparant les deux particules, la seconde particule prend une détermination corrélative de la première.

Or, sur la base de la détermination de la variable de spin d'une particule proposée par D. Böhm, John Bell, en 1964, a réussi à proposer un test expérimental permettant de réfuter l'une des deux conceptions : celle à « variables cachées » d'Einstein, basée sur le postulat de la détermination stricte du spin des particules avant toute mesure.

Ce test porte sur ce qu'on appelle l'inégalité de Bell. Si celle-ci est violée dans certaines conditions expérimentales définies, alors la mécanique quantique est vérifiée et l'hypothèse des « variables cachées » s'appuyant sur le postulat d'une détermination stricte des particules au niveau microphysique est réfutée.

En 1981, l'équipe d'Alain Aspect prouvait, dans un montage expérimental rigoureux, que l'inégalité de Bell était violée. Le spin d'une particule, en l'occurrence d'un photon, est acquis de manière aléatoire au moment de la mesure, et l'autre photon intriqué avec le premier dans le passé prend instantanément un spin opposé au premier.

Deuxième problème annoncé.

Si l'usage des probabilités est nécessaire dans l'ordre microphysique, en ce que l'indétermination des états des particules est indépassable, alors comment des lois strictes, des équations fonctionnelles strictes peuvent-elles apparaître dans l'ordre macrophysique ? Ces lois strictes et non probabilitaires ne sont-elles pas des limites d'approximation de fonction probabilitaires, statistiques qui valent au niveau microscopique sous-jacent au niveau macroscopique ? Ce problème épistémologique est celui de l'accord ou de la « correspondance » entre l'ordre microphysique et l'ordre macrophysique.

Bohr avait énoncé le « principe de correspondance » entre ces deux ordres en le fondant sur l'idée qu'un grand nombre de particules, au niveau microphysique, donne des résultats qui rejoignent ceux du niveau macroscopique. Ce qui fait des lois au niveau macroscopique des limites des lois quantiques.

À l'heure actuelle, la correspondance entre l'ordre microscopique et l'ordre macroscopique est explicable par un phénomène de « décohérence ». Hypothèse de H. Dieter Zeh, en 1970, confirmée expérimentalement en 1996.

Les particules qui sont intriquées et en états superposés entrent en interaction avec de multiples autres particules de leur environnement, ce qui équivaut à une procédure de mesure qui fixe et détermine les variables constitutives de l'état des particules. Par conséquent, un objet macroscopique étant constitué d'atomes et de particules en très grand nombre, ceux-ci perdent leur cohérence quantique, leur état indéterminé. Ainsi le caractère ondulatoire propre aux particules et aux atomes n'apparaît plus au niveau macroscopique ; et « le chat de Schrödinger », objet macroscopique ne peut être dans une cohérence quantique avec des particules de telle sorte qu'il serait lui-même dans des états superposés : à la fois mort et vivant, avant toute observation correspondant à une mesure de son état.

Cependant, au niveau macroscopique, on peut maintenir artificiellement, techniquement, la cohérence quantique des particules et suspendre le phénomène de « décohérence » : tels sont les supraconducteurs, les superfluides pour lesquels les électrons sont appariés (paires de Cooper) et se comportent comme des « bosons ». Ils échappent au principe de Pauli qui exclut que des particules de spin $\frac{1}{2}$ puissent être mises dans le même état et puissent s'apparier. Ils peuvent expérimentalement être mis dans le même état et constituer la même onde.

Ainsi les particules que sont les photons peuvent être mises dans le même état et former un condensat qu'on appelle le condensat de Bose-Einstein qui est au principe des lasers, lorsque les particules en jeu sont précisément des photons. Mais il en va de même pour les atomes qui peuvent être ralentis, refroidis et mis dans le même état quantique. Ils forment ainsi des superfluides sans aucune viscosité ou résistance qui remontent les parois du contenant dans lesquels ils sont contenus, ou encore ils forment des supraconducteurs qui repoussent tout champ magnétique à l'extérieur et peuvent ainsi léviter par ces forces électromagnétiques repoussées.

Si l'on résume la partie du développement sur les formes fonctionnelles, on distinguera donc, dans ce genre, les formes fonctionnelles strictes et les formes fonctionnelles probabilitaires. Parmi ces dernières, deux branches apparaissent : l'une, qui recouvre un très grand nombre de processus strictement déterminables, répondant donc à des lois strictes, mais dont le nombre engendre une complexité qui impose l'usage des probabilités pour rendre

compte d'une forme fonctionnelle apparemment stricte, mais qui est le cas limite d'un loi fonctionnelle probabilitaire ; l'autre, qui recouvre des processus microphysiques non strictement déterminables et dont l'indétermination²⁵ indépassable, car consubstantielle à l'opération de détermination par une mesure, est précisée dans une loi ayant valeur de principe, de telle sorte que le recours aux probabilités est nécessaire. Cependant, le processus de « décohérence » des particules, des atomes et des molécules, implique que les lois fonctionnelles strictes du niveau macroscopique ne sont pas toutes des limites de fonctions quantiques ; ce que l'on peut en revanche admettre pour des phénomènes macroscopiques dans lesquels sont techniquement maintenus les états de « cohérence » quantique (supraconducteur, superfluide, condensat de Bose-Einstein).

VI

Les formules typiques des sciences de la nature sont donc les fonctions algébriques ; et leur fonction ne s'arrête pas à la description des relations entre dimensions des phénomènes macroscopiques, ce qu'on appelle des « lois phénoménologiques » ou « empiriques », mais elles ont une portée explicative dès lors qu'elles dépassent ces lois phénoménologiques pour les intégrer dans un édifice théorique dans lequel elles peuvent être déduites à partir de « lois rationnelles » plus abstraites, au point où parfois ces lois apparaissent comme des particularisations de ces lois rationnelles, ainsi qu'on le remarque pour les lois de la mécanique classique qui valent comme simplification, particularisation des lois rationnelles que sont les principes de la relativité restreinte. Mais il en va de même pour la loi des gaz parfaits dont la phénoménologie est déductible des lois rationnelles de la cinétique et de la dynamique et du calcul des probabilités qui confèrent une intelligibilité mathématique au coefficient linéaire symbolisant la constante de cette même loi des gaz parfaits, ainsi qu'une intelligibilité à la loi elle-même comme cas limite d'une loi probabilitaire.

Mais, souligner cette puissance symbolique des fonctions mathématiques ne me semble pas suffisant pour être en phase épistémologique avec l'histoire des sciences physique et chimique.

Le devenir historique des sciences de la nature, notamment de la physique, est certes un mouvement de représentation symbolique vers une abstraction mathématique de plus en plus poussée des phénomènes et des entités microscopiques que l'on peut caractériser, à juste titre sur le plan épistémologique, comme étant un « mathématisme »²⁶ qui ne se maintient pas simplement au niveau de la seule légalité phénoménale, comme l'exige le positivisme et le néopositivisme, mais qui ne postule pas non plus une « chose en soi » qui serait totalement incontrôlable, invérifiable et donc objectivement indéterminable dans une expérimentation et dont les propriétés seraient conçues en analogie avec les caractéristiques les plus communes de la « chose » identifiable, individualisable et localisable dans l'espace et le temps ; bref : une « chose en soi » telle que pouvait la postuler le « réalisme substantialiste » d' E. Meyerson qui considérait que les sciences ne pouvaient se passer du concept de « chose »²⁷ ;

²⁵ « Unbestimmtheit » : indétermination (et non « incertitude », terme qui laisse croire que l'état de la particule est parfaitement déterminé en soi à un instant donné avec ses valeurs et que seule la détermination de ces valeurs est incertaine). L'indétermination en question est intrinsèque à la mesure et l'on ne postule pas des déterminations strictes préalables à la mesure et qui seraient cachées à notre observation.

²⁶ Cf. R. Blanché : *L'Induction scientifique et les lois naturelles*, 1975, p. 163 ; *La Science physique et la réalité*, PUF, 1948, Chap. IV.

²⁷ Cf. *De L'Explication dans les sciences*, chapitre premier.

c'est-à-dire, se passer du postulat d'existence d'un invariant substantiel par-delà toutes les données fournies par le travail de mesure et la première mise en forme légale constituante des lois phénoménologiques.

À cet indéniable mouvement d'abstraction mathématique croissant, à ce « mathématisme » des sciences que sont la physique et la chimie, il faut adjoindre l'aspect technique, matériel des instruments de toute expérimentation scientifique. Etat de la science que Bachelard, en 1949, dans *Le Rationalisme appliqué*, caractérisait comme un état « abstrait-concret », et qu'il avait déjà aperçu, dès 1934, dans *Le Nouvel esprit scientifique* comme un « des traits distinctifs de l'esprit contemporain »²⁸.

Bachelard, très tôt, dès 1931²⁹, a pris acte de ce lien serré que la science contemporaine établit en physique entre la rationalité de type mathématique et ce qu'il a appelé la « phénoménotechnique ».

La rationalité mathématique n'est pas une description, une expression de données phénoménales ou des relations entre des dimensions mesurables de ces phénomènes, elle est une pensée qui porte sur l'intelligibilité des phénomènes, sur des relations purement intelligibles qui ne sont pas directement constatables au niveau des phénomènes, sinon de manière indirecte dans un montage expérimental (tel l'effet Zeeman, par exemple).

Cette rationalité mathématique est une « nouménologie » et elle porte sur un « noumène ». Et ce sont, selon Bachelard, ces noumènes qui sont réalisés techniquement, matériellement dans les laboratoires.

La science contemporaine, en acte, est faite d'un couplage entre un « rationalisme mathématique appliqué » et un « matérialisme technique » réalisant techniquement cette rationalité mathématique, ainsi qu'il le thématise, en 1949, dans *Le Rationalisme appliqué*.

Pour bien saisir en quoi le matérialisme technique est une réalisation de « noumènes » mathématiques, il nous faut insister sur le sens du terme de « noumène » chez Bachelard.

Bachelard reprend ce terme du corpus kantien pour lui faire signifier tout autre chose que Kant.

Chez Kant, le « noumène » désigne la « chose-en-soi » inaccessible à l'esprit humain. Au sens négatif, le « noumène » désigne ce que l'intuition sensible ne peut saisir et qui est au fondement des phénomènes spatiotemporels, seuls donnés à notre intuition sensible. Au sens positif, le « noumène » désigne ce qu'une « intuition intellectuelle » pourrait atteindre et qui se situe au-delà des phénomènes spatiotemporels.

Selon Bachelard, le « noumène » au sens négatif désigne la réalité profonde et cachée des phénomènes et qui se situe, par exemple, au niveau microphysique. Au sens positif, le « noumène » est l'intelligible de cette réalité cachée qui est saisie, pensée et exprimée dans un formalisme mathématique. Cet intelligible est posé comme « raison » des phénomènes, comme « cause rationnelle profonde » des phénomènes mesurables.

Les « noumènes » de la rationalité physicomathématiques sont des configurations abstraites qui débordent la réalité naturelle, qui la transcende en dessinant ses possibilités de

²⁸ Cf. *Le Nouvel esprit scientifique*, 1934, p. 5.

²⁹ Cf. Noumène et microphysique, *Etudes*, Vrin.

telle sorte que la nature peut être provoquée techniquement, matériellement, par des instruments d'expérience de la « cité scientifique » et « technicienne »³⁰ pour faire émerger soit des possibles déjà réalisés par la nature, soit des possibles non encore réalisés par cette même nature.

Ainsi, la « nouménologie » des formalismes mathématiques en physique, – mais c'est également le cas en chimie, – se couple dans une dialectique serrée avec ce que j'appelle une

« nouménotechnie »³¹, pour fonder un « réalisme scientifique »³² qui garantit l'objectivité des sciences et leur portée ontologique, puisque l'ontogénie des noumènes se réalise dans une ontogénie technique qui reconstruit les opérations mêmes de la nature, voire qui en prolonge les possibilités.

Loin donc de circonscrire les formules des sciences physique et chimique dans l'ordre de la seule

« représentation symbolique », dans l'ordre du langage, il convient de voir en elles, lorsqu'elles sont fortement mathématisées et qu'elles dépassent le niveau des lois phénoménologiques ou empiriques, des « lois nouménologiques » qui reconstruisent dans l'algèbre de la pensée mathématique les opérations mêmes de la nature qui sont techniquement réalisées sur le plan instrumental.

*

* *

Les formules des sciences physiques sont donc attributives, causales et fonctionnelles. Elles répondent respectivement et principalement, sur le plan phénoménal et au niveau transphénoménal des entités microphysiques, à la recherche de classification objective, de relation d'implication entre phénomènes ou entités, de relations logicomathématiques entre dimensions intra- phénoménales ou constitutives de l'état d'une entité dont la validité, des unes et des autres, doit être universelle et nécessaire.

Celles qui sont typiquement scientifiques sont les « formules fonctionnelles » ; et ce, dès l'émergence des sciences au XVII^e siècle avec Galilée et Descartes qui privilégient les équations algébriques pour établir des relations entre les dimensions mesurables des phénomènes. Les « lois causales » qui relient les événements selon le foncteur logique de l'implication n'étant pas, malgré qu'on en ait, à concevoir comme modèle type des lois scientifiques, au motif que les implications matérielles régulières qu'elles expriment n'atteignent pas l'apodicticité des relations physicomathématiques au sein d'un « référentiel », d'une mise en forme des phénomènes à partir de principes, de lois fondamentales de type fonctionnel, comme peut l'être la « forme mécanique ».

Au sein du genre des lois fonctionnelles dont l'évolution va de pair avec la mathématisation de la physique et de la chimie en ce qu'elle s'appuie de plus en plus sur les résultats de la physique, nous pouvons distinguer deux espèces modales : les lois strictes et les lois probabilitaires. Parmi les lois probabilitaires on distinguera deux branches. L'une, portant sur des entités et des processus microphysiques, mais dont le nombre et la complexité

³⁰ Cf. *L'Activité rationaliste de la physique contemporaine*, 10/18, UGE, p. 17

³¹ Cf ; Michel-Elie Martin, *Comment par la technique le rationnel se fait-il réel ?* M'éditer, 2012.

³² Cf. *Le Rationalisme appliqué*, PUF, 1975, [1949], p. 8.

imposent le recours au calcul des probabilités, de telle sorte que certaines lois strictes sont posées comme des cas limites d'une forme fonctionnelle probabilitaire ; l'autre, portant sur des processus et des entités microphysiques, mais dont l'état est intrinsèquement indéterminable au-delà d'une certaine précision ; et ce, de manière indépassable, de telle sorte que les probabilités interviennent pour déterminer les variables conjuguées de l'état d'une particule que sont sa position spatio-temporelle et sa quantité de mouvement.

Dans la première branche, le recours aux probabilités est lié à une ignorance pratique des déterminations strictes qu'on ne peut que difficilement lever. Dans la deuxième branche, le recours aux probabilités est lié également à une ignorance pratique, mais indépassable puisque toute observation à l'échelle quantique introduit un « quantum d'action », une quantité d'énergie minimale qui introduit une nécessaire indétermination quant aux mesures des variables de l'état d'un système.

La fonction des formules scientifiques telle que nous la présente l'histoire de la physique, c'est-à-dire avec l'émergence et la multiplication des « lois nouménologiques », consiste non seulement à décrire, à prévoir et à expliquer la nature, mais encore, conformément à sa puissance actuelle, à la reproduire, la reconstruire et à actualiser ses propres possibles par une technique instrumentale, un matérialisme technique réalisant les noumènes physicomathématiques. Une nouvelle période scientifique s'affirme : celle de la nouménotechne réalisant la nouménologie mathématique.

Michel-Elie Martin.

Conférence à la SNP, Nantes, 18 mars 2022.