

## 2.1- Régions ontologiques en physique quantique

François Lurçat

Il s'agira dans cette intervention de régions ontologiques ; dans des régions ontologiques différentes, le verbe être n'a pas la même signification. Exemple : ce verbe n'a pas la même signification dans les phrases « le parapluie de Paul est dans cette pièce » et « le nombre quatre est pair ».

Au début du XX<sup>e</sup> siècle la physique était unifiée et triomphante : mécanique, amendée par la relativité ; électromagnétisme ; théorie des électrons de Lorentz. On pouvait espérer que les découvertes récentes (spectres atomiques, électron, rayons X, radioactivité...) entreraient dans les cadres déjà établis. Il n'en fut rien : les expériences de Rutherford amenèrent Bohr à formuler en 1913 une théorie de l'atome planétaire qui brisa — peut-être pour toujours, là est la question — l'unité de la physique. Rien ne permet de mieux se rendre compte des implications de l'atome de Bohr pour le problème qui nous occupe aujourd'hui que les doléances de Lorentz, dont il faisait part en 1924 au jeune physicien soviétique Joffé :

« Aujourd'hui, exposant la théorie électromagnétique, j'affirme qu'un électron sur une orbite rayonne de l'énergie, et demain, dans le même amphithéâtre, je dis que l'électron ne perd pas d'énergie en tournant autour du noyau. Où donc est la vérité, si on peut affirmer deux choses qui s'excluent mutuellement ? D'une façon générale, sommes-nous capables de connaître la vérité, et cela a-t-il un sens de s'occuper de science ? » [1]

Tout est dit, ou presque, dans cette plainte sur l'unité perdue. Bohr a pensé qu'il y avait un abîme entre la physique classique et la nouvelle physique des atomes, et il s'est placé hardiment de l'autre côté de l'abîme [2]. L'effort de l'ancienne théorie des quanta, édifiée entre 1913 et 1925 autour du principe de correspondance, consista à utiliser les lois de l'ancienne physique pour étudier les phénomènes atomiques. Mais en 1925, Max Born et Heisenberg, avec l'aide de Jordan, édifient la mécanique quantique, qui va voler de succès en succès. Au lieu du tâtonnement et de la « divination systématique » de l'ancienne théorie, on a maintenant un formalisme rigoureux et cohérent. On s'aperçoit bientôt qu'il contient la physique classique comme cas limite. La douloureuse scission n'est-elle plus désormais qu'un mauvais souvenir ?

Il y a deux réponses possibles. Beaucoup de théoriciens, ceux en particulier qui privilégient l'étude de la structure mathématique de la théorie, pensent qu'en effet le formalisme quantique relègue l'ancienne théorie des quanta au musée et rétablit l'unité de la physique. D'autres théoriciens, et la plupart des expérimentateurs, considèrent l'existence de deux régions — classique et quantique — comme une évidence ; ce sont d'ailleurs eux, souvent, qui ont été les artisans du récent renouveau de l'ancienne théorie des quanta [3]. Examinons les deux positions.

Il y a quelque temps, je racontais à deux jeunes expérimentateurs en physique des particules que, selon beaucoup de théoriciens, les appareils dont ils se servent doivent être, en toute rigueur, décrits par la mécanique quantique. Mes interlocuteurs éclatèrent de rire. La signification théorique de ce rire est la suivante : la description quantique d'un appareillage qui emplit un grand hall et pèse beaucoup de tonnes est une possibilité de principe qui n'est jamais mise en doute, mais qui n'est jamais actualisée non plus. De même les spécialistes de la mécanique céleste qui étudient les mouvements des planètes et de leurs satellites ne contestent pas, que je sache, qu'on puisse écrire l'équation de Schrödinger du système solaire, seulement, en fait, personne ne l'écrit parce qu'elle ne sert à rien.

Nous trouvons alors deux attitudes : le rationaliste, héritier de Pythagore, de Descartes et de Galilée, d'Einstein et de Heisenberg, de John Bell aussi, déclare qu'il n'y a pas de quoi rire et que les raisonnements qui ne sont valables que « pour tous les buts pratiques » — « *for all practical purposes* », que Bell abrégait ironiquement en FAPP [4] —, ces raisonnements n'ont pas de valeur théorique. L'empiriste, héritier de Bacon et de Newton, de Bohr et de Feynman, rit avec mes deux interlocuteurs et dit que le but de la physique est de décrire et d'expliquer des phénomènes réels, ou de formuler leurs lois ; comme ils sont connus par l'expérience avec une certaine incertitude, une théorie qui en rend compte avec une approximation du même ordre est parfaitement satisfaisante.

Le rationaliste, dans le cas qui nous occupe, c'est d'abord von Neumann. Dans son grand traité de 1932 il explique que la mécanique quantique rend obsolètes toutes les considérations sur les ondes et les particules, qui ont tellement troublé les physiciens depuis le début du siècle ; elle se définit en effet par un formalisme — lié à l'espace de Hilbert en l'occurrence — et des règles de correspondance entre ce formalisme et les résultats d'expériences. Plus tard le grand mathématicien raffina sa position, en définissant avec Birkhoff une logique quantique.

Mais, pour ce qui nous concerne ici, le plus important est que, pour von Neumann, la physique classique est désormais périmée en tant que théorie fondamentale. Chacun s'accorde, en effet, pour constater que le formalisme de la physique classique peut s'obtenir à partir de celui de la mécanique quantique comme cas limite, quand la constante de Planck tend vers zéro. Bien sûr ce passage à la limite pose des problèmes mathématiques difficiles, mais quel que soit leur intérêt, on ne peut guère douter du résultat. Mais voici qui prête davantage à controverse. Pour von Neumann, cette propriété mathématique suffit à changer radicalement le statut de la physique classique : elle n'est plus désormais qu'une théorie d'ingénieur, commode quand on s'occupe de problèmes macroscopiques, mais qui a perdu la signification fondamentale qu'on lui attribuait depuis Newton et Maxwell. Il n'y a pas deux régions, une région classique et une région quantique : il y a une théorie unique, la mécanique quantique, exactement valable pour tous les phénomènes physiques. Et puis il y a des raisons de commodité, qui, certes, justifient l'usage des concepts classiques

dans certains cas, mais sans que cela puisse leur faire retrouver le statut qu'ils ont désormais perdu.

Le point de vue de Bohr est radicalement différent. Dans son exposé de septembre 1927 au congrès de Côme [5], il présente une interprétation de la mécanique quantique dont la pertinence et la profondeur ont été et sont, à mon avis, radicalement sous-estimées. Il caractérise la théorie quantique par le fait qu'elle « apporte une limitation essentielle aux concepts de la physique classique dans leur application aux phénomènes atomiques ». Ce qui implique évidemment que les concepts classiques, bien que leur pertinence soit limitée quand il s'agit de phénomènes atomiques, conservent cependant une certaine validité dans ce domaine.

Mais cela ne signifie pas que Bohr veuille rétablir l'unité perdue. Pour lui la spécificité des phénomènes atomiques est exprimée par le postulat quantique, qui attribue aux processus atomiques un caractère d'indivisibilité « complètement étranger aux théories classiques, et caractérisé par le quantum d'action de Planck ». Plus précisément, le postulat quantique énonce que toute observation des processus atomiques entraîne une interaction finie avec l'instrument d'observation : et Bohr ajoute ceci, qui est ce qui nous importe le plus aujourd'hui : « on ne peut par conséquent attribuer ni aux phénomènes ni à l'instrument d'observation une réalité physique autonome au sens ordinaire du mot ». Par la suite, Bohr insiste avec force sur le fait que le dispositif expérimental doit être décrit en termes de concepts classiques.

Tout cela signifie — j'abandonne ici le langage de Bohr, sinon ses idées — que les objets atomiques appartiennent à une région ontologique nouvelle, inconnue de la physique classique. La physique classique permettait d'analyser un système physique en autant de composantes que nécessaires ; ces composantes étaient en général en interaction, mais leurs définitions respectives étaient parfaitement indépendantes les unes des autres.

Si j'étudie le système solaire, chacun des corps qui le composent est défini indépendamment des autres ; sa position et sa vitesse sont définies en elles-mêmes ; si leur mesure doit faire intervenir d'autres corps, c'est uniquement pour définir un système de référence. Au contraire, l'électron qui traverse un microscope électronique, ou encore le photon qui traverse un dispositif interférentiel, ne peut pas être défini indépendamment du dispositif expérimental qui permet leur préparation et leur observation. On ne peut pas poser une question sur l'électron, demander par exemple quelle est sa position ou sa quantité de mouvement à un instant donné, sans préciser le dispositif expérimental qui permettra de répondre à cette question ; d'où découle, comme on sait, la solution des fameux paradoxes de la mécanique quantique.

L'existence de deux régions ontologiques au sein du monde de la physique est très mal comprise et très mal acceptée par les physiciens. Un article récent [6] de van Kampen montre comment la mécanique quantique implique que les

systèmes macroscopiques obéissent aux lois classiques. Il montre du même coup pourquoi la description quantique d'un système macroscopique n'est pas pertinente ; il remarque par exemple que si on considère un millimètre cube d'air comme un système quantique, la distance moyenne entre deux niveaux d'énergie est de l'ordre de  $10^{-1017}$  — il est inutile de préciser l'unité ! La notion de vecteur d'état du millimètre cube d'air est donc totalement spéculative, elle ne correspond à rien de décelable par l'expérience.

Mais van Kampen reproche à Bohr de donner l'impression qu'il y a un royaume quantique au niveau atomique, et un royaume classique au niveau macroscopique. Quel mal y a-t-il à cela ? En fait, van Kampen sous-entend que, pour Bohr, la mécanique quantique ne serait pas vraie dans le « royaume classique ». Or le problème n'est pas qu'elle serait fautive dans le domaine macroscopique, mais qu'elle n'est pas pertinente — je laisse de côté les SQUIDS et autres systèmes réputés quantiques macroscopiques ; si nous parvenons à comprendre les systèmes ordinaires, il sera toujours temps de passer à l'étude des SQUIDS.

Deux remarques pour conclure. D'abord, l'insistance de Bohr sur la validité, certes limitée, des concepts classiques dans le domaine quantique a parfois été considérée, en son temps, comme un signe d'archaïsme, de refus de la modernité. Il apparaît aujourd'hui que, loin d'être en retard sur le progrès de la théorie quantique, Bohr était en avance. Depuis l'avènement du chaos, les approximations semi-classiques ont acquis une dignité théorique nouvelle. Les trajectoires périodiques — généralisation des orbites de Bohr de l'atome d'hydrogène — permettent de s'orienter dans le maquis des valeurs propres d'un système quantique comme l'atome d'hydrogène dans un champ magnétique fort, ou l'atome d'hélium [3d]. Il est de moins en moins raisonnable de vouloir exclure purement et simplement les concepts classiques de la théorie quantique fondamentale, en les réduisant au rôle de concepts d'ingénieur. Les concepts classiques sont nécessaires, selon l'interprétation bohrienne de la mécanique quantique, pour décrire l'environnement macroscopique d'un objet quantique, environnement dont il n'est pas séparable en principe. Ils sont nécessaires pour définir nombre de concepts quantiques : diffraction, effet tunnel [3d]. Enfin, comme le disent Heller et Tomsovic [3d], ils sont nécessaires si l'on veut comprendre nombre de phénomènes et de propriétés dans les domaines atomique, moléculaire, nucléaire, mésoscopique. Je dis pour comprendre, et non pour calculer : on peut souvent résoudre numériquement des équations de Schrödinger, obtenant des résultats en accord avec l'expérience. Mais comme le disait une fois Wigner, cité par les mêmes auteurs, « c'est très beau de savoir que l'ordinateur comprend le problème, mais j'aimerais le comprendre moi aussi ». Les concepts classiques sont plus vivants que jamais, ils ont trouvé de nouveaux champs d'application. L'idée d'une théorie purement quantique, qui ferait des concepts classiques des concepts dérivés ou même superflus, ne correspond pas au contenu physique de la théorie quantique. L'idée d'une région classique, domaine où les concepts classiques sont valables sans restriction, n'est donc pas seulement une évidence pratique, elle a aussi des lettres de noblesse théorique de plus en plus convaincantes.

D'autre part, la question de savoir si la physique quantique définit une nouvelle région ontologique, distincte de la région classique, a des implications métaphysiques intéressantes. La physique classique, telle qu'elle a été fondée par Galilée, s'écarte du sens commun en ce sens qu'elle fait abstraction des « qualités secondes » des objets physiques pour ne retenir que leurs formes et leurs mouvements. Mais, d'autre part, elle est proche du sens commun en ce sens qu'elle permet de visualiser les mouvements qu'elle étudie, chaque objet ayant à chaque instant une position définie. Il y a donc un lien organique entre la physique classique et le sens commun. On peut dire que le physicien classique est convaincu de la réalité du monde sensible, ou, du moins, que, s'il doute de cette réalité, c'est pour des raisons qui lui sont propres et qui n'ont rien à voir avec sa science.

Bohr fait dépendre l'interprétation de la mécanique quantique de la physique classique. Cela signifie que, pour lui, la mécanique quantique ne remet pas en cause la réalité du monde sensible. Les objets atomiques ont une réalité physique non autonome, mais liée à celle de leur environnement macroscopique ; cela définit pour eux un mode d'être particulier, mais cela ne les prive pas de réalité. Et cela ne prive pas davantage de réalité l'environnement macroscopique — l'appareil de mesure. Les appareils sont des objets en métal, en verre, etc. ; leur description par la physique classique est un raffinement du point de vue du sens commun, qui ne contredit nullement celui-ci. C'est pourquoi Bohr explique [7] que décrire les expériences en termes de concepts classiques permet d'en communiquer à autrui le dispositif et les résultats. C'est pourquoi aussi, dans le compte rendu de son débat avec Einstein, il dessine les appareils dans un style réaliste et non dans le style schématique usuel des articles de physique [8]. « Niels Bohr, écrivait Max Born [9], a toujours insisté sur le fait qu'on ne peut décrire aucune expérience réelle sans utiliser le langage ordinaire et les concepts du réalisme naïf ». En un mot, Bohr était convaincu de la réalité du monde sensible, et sa conception de la mécanique quantique avait pour fondement métaphysique cette conviction.

En revanche, la réalité du monde sensible devient problématique si on adopte le point de vue des partisans d'une région ontologique unique, des partisans du « tout quantique » comme von Neumann ou aujourd'hui Roland Omnès. La réalité de base, pour eux, n'est pas le monde sensible, mais l'espace de Hilbert, à partir duquel ils s'efforcent — c'est aujourd'hui l'effort d'Omnès — de déduire le sens commun et donc le monde sensible. De même, Heisenberg pensait que la réalité des objets quantiques se dissolvait « dans la transparente clarté des mathématiques ».

Le physicien convaincu de la réalité du monde sensible, d'où les objets physiques sont extraits par chirurgie, ne craint pas de faire des approximations ; elles ne remettent pas en cause la réalité et n'ont donc rien de scandaleux. De toute manière, pour lui, la correspondance entre le monde sensible et les mathématiques est approximative par essence.

En revanche, le théoricien, qui doit tout déduire d'un schéma mathématique, y compris le monde sensible, sent reposer sur ses épaules la responsabilité du démiurge. On peut comprendre alors son horreur des approximations : la correspondance entre le monde sensible et les mathématiques est pour lui — comme pour son ancêtre Pythagore — une identité. La moindre inexactitude peut être la paille qui fera avorter le monde sensible ou qui aboutira à un autre monde.

## Références

- [1] A.F. Joffé, *Vstretchi s fizikami (Rencontres avec des physiciens)*, Moscou, 1960.
- [2] « We thus see that, contrary to Planck and Einstein, Bohr did not try to bridge the abyss between classical and quantum physics, but from the very beginning of his work, searched for a scheme of quantum conceptions which would form a system just as coherent, on the one side of the abyss, as that of the classical notions on the other side of the abyss ». Max Jammer, *The conceptual development of quantum mechanics*, Mc Graw-Hill, New York, 1966, p.88.
- [3a] J.H. Van Vleck, D.L. Huber, « Absorption, emission and linebreadths: a semihistorical perspective », *Reviews of Modern Physics* 49 (1977), pp. 939-959.
- [3b] W.H. Miller, « Semiclassical methods in chemical physics », *Science* 233 (1986), pp. 171-177.
- [3c] T. Uzer, D. Farrelly, J.A. Milligan, P.E. Raines, J.P. Skelton, « Celestial mechanics on a microscopic scale », *Science* 253 (1991), pp. 42-48.
- [3d] E.J. Heller, S. Tomsovic, « Postmodern quantum mechanics », *Physics Today*, juillet 1993, pp. 38-46.
- [3e] Martin C. Gutzwiller, *Chaos in classical and quantum mechanics*, Springer, New York, 1990.
- [4] J. S. Bell, *Speakable and unspeakable in quantum mechanics*, Cambridge University Press, 1987. Le sigle FAPP ne se trouve peut-être pas dans ce livre, mais je suis certain de l'avoir lu sous la plume de Bell.
- [5] N. Bohr, *La théorie atomique et la description des phénomènes*, Gauthier-Villars, Paris, 1932. Réédité par Jacques Gabay, Sceaux, 1993. (Diffusion-distribution: Jacques Gabay, 151 bis rue Saint-Jacques, 75005 Paris).
- [6] N.G. van Kampen, « Macroscopic systems in quantum mechanics », *Physica A* 194 (1993), pp. 542-550.
- [7] N. Bohr, « Discussion avec Einstein sur des problèmes épistémologiques de la physique atomique », dans *Physique atomique et connaissance humaine*, coll. "Folio Essais", Gallimard, 1991.
- [8] M. Born, *Physics in my generation*, Pergamon, Londres, 1956, p. 153.