

L'INTERPRÉTATION DE LA MÉCANIQUE QUANTIQUE

Les grands systèmes philosophiques des xvii^e et xviii^e siècles étaient en relation étroite avec la science de leur temps. Descartes, Leibniz, étaient eux-mêmes de grands mathématiciens et physiciens. Le xix^e siècle a vu pourtant les deux disciplines devenir étrangères l'une à l'autre. Tandis que les philosophes se tournaient vers des considérations métaphysiques, les scientifiques se laissaient happer par l'accélération du progrès technique et la spécialisation de la recherche. La naissance et le développement de la science contemporaine — théories de la relativité et physique quantique — ont donné cependant un second souffle au domaine des « fondations » de la physique, où philosophes et physiciens collaborent en vue d'une meilleure compréhension des difficultés conceptuelles ainsi que des réponses qui leur sont données.

Le but de cette présentation modeste est de donner un aperçu des problèmes que pose l'interprétation de la physique quantique. Ces problèmes sont essentiellement au nombre de deux : celui de la mesure, ou de la réduction du paquet d'onde, et celui des relations de Heisenberg, qui interdisent que ne soient définies simultanément certaines grandeurs physiques avec une dispersion arbitrairement petite. Plus précisément, et afin de ne pas dresser ici un catalogue, nous nous proposons de montrer comment ces difficultés s'articulent autour du problème central de la superposition. Ceci nous permettra par ailleurs de souligner certaines confusions qui ont pu donner lieu à des interprétations naïves des problèmes de la mesure et des relations de Heisenberg. Enfin, il s'agira pour nous de mettre en avant le caractère proprement spécifique des systèmes quantiques tels que décrits par le formalisme standard.

Les difficultés d'interprétation de la physique quantique

La nature des problèmes liés à la mécanique quantique

Avant d'aborder les difficultés que soulève la mécanique quantique, il faut prévenir tout malentendu en précisant qu'elles ne remettent

aucunement en cause la valeur opératoire de la théorie. La mécanique quantique est sans doute l'une des théories les plus « vérifiées » et ce, de manière exceptionnellement précise. Les problèmes qui se posent ici sont essentiellement conceptuels. Le formalisme fonctionne très bien, et seule l'interprétation qu'on en fait est sujette à questionnement.

Ensuite, il ne faudrait pas croire que le fait que les descriptions classiques et quantiques divergent (par exemple, un système classique est complètement décrit par sa position *et* son impulsion à tout instant, ce qu'interdit la physique quantique) pose un problème en soi pour la physique. Pour la mécanique classique, l'apparition de la théorie quantique n'implique en aucun cas son abandon. C'est même une forme de progrès pour elle que de se voir délimiter strictement son domaine et ses conditions d'application. Nous en revenons encore au fait que les problèmes sont plus philosophiques que proprement physiques. Ce n'est pas la mécanique classique qui est remise en cause (elle est interprétable comme une bonne approximation de la mécanique quantique au-delà d'une certaine limite définie par la constante de Planck, ou quantum d'action), mais bien le système des idées épistémologiques et des concepts physiques et métaphysiques de la philosophie classique (de Descartes à Kant et au néokantisme).

Les notions de trajectoire, de point matériel perdent en pertinence, voire deviennent illégitimes. Ce sont encore les conceptions des rapports entre objet et sujet, ou de la réalité, qui seront mises en danger par les pères fondateurs. Tous imprégnés d'une forte culture philosophique, toujours liée au néo-kantisme (pour ou contre), ils prôneront en particulier l'éclatement du modèle de l'objectivité basé sur le triplet espace-temps-causalité, tiré de l'analyse kantienne des formes de l'intuition et des catégories de l'entendement. Il s'agit donc pour nous, non pas de prétendre mettre en doute la théorie quantique, mais de donner ici une idée des difficultés conceptuelles liées à un formalisme par ailleurs exceptionnellement efficace.

Le problème de la mesure

La première difficulté réside dans la nécessité du postulat de la réduction du paquet d'onde. Connue sous le nom de problème de la mesure en théorie quantique, elle tient essentiellement au fait que le formalisme (dans son interprétation orthodoxe au moins) comprend deux lois d'évolution pour les systèmes physiques, selon qu'ils subissent une mesure ou pas. La loi générale d'évolution des systèmes ne peut pas rendre raison du processus de mesure, en particulier ne peut pas interpréter la mesure comme une interaction entre l'appareil et le système. La réduction du paquet d'onde obéit à une loi indépendante de celle régissant l'évolution du système.

Il faut insister sur ce point. Le problème de la mesure ne consiste pas en ce que l'instrument interagisse avec le système de telle sorte que la mesure soit « faussée » par cette interaction : même un thermomètre plongé dans un liquide en modifie (à un certain degré...) la température, alors qu'il n'était censé que la mesurer. Mais cette *interaction* (l'équilibre thermique qui se produit entre le thermomètre et le système) *peut elle-même être décrite au moyen des équations de la théorie thermodynamique*, et rien n'interdit *en principe* d'étudier cette interaction comme tout autre échange de chaleur. Que la mesure modifie l'état du système ne constitue donc pas une révolution. Ce qui est vraiment problématique, c'est que cette modification est *discontinue* et *non-déterministe* : alors que la fonction d'onde, ou le vecteur d'état, qui donne une description du système considéré fournit un spectre de valeurs possibles au moyen d'une distribution de probabilités, la mesure ne donne pour résultat qu'une unique valeur. Même si un grand nombre de mesures montre que la distribution suit la loi de probabilité donnée par l'équation, le *processus de mesure n'obéit pas aux lois d'évolution* applicables à tout autre processus. Le vrai problème de la mesure est donc justement que la réduction du paquet d'onde ne peut pas être interprétée comme une interaction entre le système et l'instrument dans le cadre de la théorie quantique.

Expliquons cela un peu plus avant. Tout tient, pourrait-on dire, à la *linéarité* du formalisme de la mécanique quantique. L'état d'un système en physique quantique est décrit par vecteur d'état dans un espace de Hilbert. Sans aller dans les détails techniques du formalisme, si le vecteur d'état $\Psi(t)$ peut s'écrire comme combinaison linéaire :

$$\Psi(t) = \gamma_1 \psi_1 + \gamma_2 \psi_2$$

dans la base $\{\psi_1, \psi_2\}$ des vecteurs propres d'un opérateur ayant pour valeurs propres α_1 et α_2 , alors le postulat de la mesure indique que le résultat de la mesure sera soit α_1 avec la probabilité $|\gamma_1|^2$, soit α_2 avec la probabilité $|\gamma_2|^2$. L'état du système, après la mesure, sera « réduit » à l'un des deux états ψ_1 ou ψ_2 . L'équation de Schrödinger, donnant l'évolution du système en dehors de la mesure, ne rend pourtant pas compte de la réduction, comme nous allons pouvoir le constater. Essayons en effet de décrire la réduction comme interaction entre le système, de fonction d'onde Ψ , et l'appareil, disons de fonction d'onde Φ . Il faudrait que la considération du système $|\Psi\rangle|\Phi\rangle$ permette de donner le résultat final $\Psi = \psi_1$ ou ψ_2 . Or la linéarité de l'équation de Schrödinger a pour conséquence que la mécanique quantique prédit que l'état final du système sera au contraire :

$$|\Psi\rangle = \gamma_1 |\Psi_1\rangle|\Phi_1\rangle + \gamma_2 |\Psi_2\rangle|\Phi_2\rangle$$

Ce qui signifie que, bien loin que le vecteur d'état du système soit réduit par l'interaction, c'est l'appareil de mesure qui a été « contaminé » par la superposition. C'est une des formes de ce qu'on appelle le *paradoxe du chat de Schrödinger* : l'appareil de mesure, pourtant macroscopique et susceptible d'une description classique, se retrouve en état de superposition à la suite de la mesure. On n'a pourtant jamais vu une aiguille se mettre simultanément sur deux valeurs différentes ! On ne s'attardera pas ici sur l'immense littérature qui existe à propos du problème de la mesure ¹. On tâchera bien plutôt de montrer qu'il est un *cas particulier du problème de la superposition*. Mais avant cela, revenons à la question des relations dites encore trop souvent « d'incertitude », dues à Heisenberg.

Les relations d'indétermination de Heisenberg

À toute grandeur physique, ou propriété physique, comme la position, l'impulsion (définie comme le produit de la masse par la vitesse), ou l'énergie, correspond un *opérateur*. Les opérateurs transforment un vecteur en un autre vecteur, tout comme les fonctions réelles transforment un nombre réel en un autre nombre réel. Les relations dites d'incertitude expriment l'impossibilité de donner simultanément des valeurs arbitrairement précises à deux grandeurs physiques dont les opérateurs ne commutent pas. L'exemple le plus fréquent est celui qui relie les dispersions sur la localisation et sur l'impulsion. Mais la démonstration vaut pour toutes les quantités physiques dites « incompatibles ». Encore une fois, nous ne pouvons pas entrer dans les détails techniques ici. Il nous est cependant possible de souligner que les relations de Heisenberg ne sont pas liées à une forme d'incertitude sur la mesure ou à un défaut de précision des instruments. De nombreuses confusions existent à ce sujet. En particulier, il est faux de dire qu'elles énoncent qu'on ne *peut pas déterminer* la position d'un système au-delà d'une certaine *limite*, parce que *l'observation* de *cette particule* implique qu'on éclaire, et donc qu'on envoie de l'énergie sur le système, ce qui aurait pour effet de le *perturber* (cette interprétation est connue sous le nom du microscope de Heisenberg : elle fut en effet la première interprétation donnée par Heisenberg lui-même). Les relations de Heisenberg apparaîtraient alors comme l'expression de la limite inférieure de la perturbation induite par le processus de mesure. Tentons de démêler tout ça.

Avant tout, les relations d'indétermination font *partie intégrante du formalisme*. Globalement, on peut dire qu'elles dérivent de la possibilité

1. On pourra consulter pour une première approche claire et non technique D. Z. ALBERT, *Quantum Mechanics and Experience*, Cambridge, Harvard University Press, 1992.

de faire une « analyse de Fourier » sur la fonction d'onde, et des relations de transformations qu'entretiennent deux opérateurs incompatibles. Cette analyse n'est que la décomposition linéaire de la fonction d'onde dans la base des vecteurs propres de l'opérateur. Ces vecteurs correspondent aux états stationnaires. De la même façon, un signal, sonore par exemple, peut se comprendre comme la superposition de signaux sinusoidaux, appelés « stationnaires » parce qu'ils conservent la même forme dans le temps. Ainsi la décomposition linéaire de la fonction d'onde dans la base des vecteurs propres n'est-elle pas autre chose que l'écriture de cette fonction comme superposition de fonctions plus simples ². Mais deux opérateurs peuvent n'avoir *pas les mêmes vecteurs propres*, et le vecteur d'état peut donc présenter *deux décompositions différentes*. Ces deux décompositions peuvent cependant ne pas être indépendantes, et ce sont les *relations* qu'elles entretiennent, liées bien évidemment à celles qu'entretiennent les deux opérateurs (relations de transformations), qui impliquent que les *valeurs réciproques des écarts type* ³ *de deux observables ne sont pas indépendantes*. Les relations de Heisenberg énoncent que leur produit est *borné inférieurement*.

Mais, encore une fois, ceci est vrai en dehors de toute expérience : la fonction d'onde seule suffit à donner la loi de probabilité, l'écart type des observables, et finalement leur corrélation. Il est vrai que l'inégalité est *respectée* par l'expérience. Préparons en effet N systèmes dans un état identique, et mesurons la position de la moitié d'entre eux, et l'impulsion de la moitié restante. Alors chacune de ces séries de mesure présente un écart type, Δx pour la position, et Δp_x pour l'impulsion (en restreignant le problème à une seule dimension). On pourra alors vérifier que ces deux écarts type, liés aux deux séries de mesure parallèles, obéissent à l'inégalité de Heisenberg. Mais que l'on puisse observer les corrélations ne signifie bien évidemment pas qu'elles sont liées au processus de la mesure.

Les relations de Heisenberg n'énoncent donc pas une limite sur notre capacité à connaître les systèmes quantiques, mais bien, si on prend le formalisme au sérieux, une *propriété intrinsèque* de ces systèmes : un système ne peut pas être *conçu* comme ayant simultanément une position *et* une impulsion définie plus précisément que ne l'autorisent les relations. Les incertitudes sur la mesure, encore une fois, sont le pain quotidien de l'expérimentation en physique et sont en un sens parfaitement

2. Pour une explication simple du lien entre relations de Heisenberg et inégalités spectrales en mécanique ondulatoire classique, voir J.-M. LEVY-LEBLOND, F. BALIBAR, *Quantique*, InterÉditions, 1990, ch. 1 et 3 et J.-M. LEVY-LEBLOND, *Aux contraires. L'exercice de la pensée et la pratique de la science*, Gallimard, 1996, p. 192 sq.

3. L'écart type est la mesure mathématique de la dispersion d'une variable. Pour le dire simplement, l'écart type mesure l'écart à la moyenne des valeurs prises par la variable considérée.

« déterminées ». Il est vrai qu'une mesure sur un système quantique, comme n'importe quelle mesure, perturbera ce système ; il est vrai aussi que cette perturbation ne peut être inférieure à la constante de Planck, conçue comme quantum d'action (« valeur » de l'action minimale), mais ça n'est pas là ce qu'expriment les relations de Heisenberg. Ce n'est pas que l'impulsion est *perturbée*, et que cette perturbation nous empêche de la *connaître* autant que l'on voudrait, c'est qu'elle n'est pas *définie* au-delà de la limite réciproque prescrite. L'interprétation en termes de perturbation occulte la spécificité du problème de la mesure en le réduisant à un simple problème d'interaction minimale entre l'appareil et le système. Or, la réduction du paquet d'onde, on l'a vu, ne peut s'interpréter en termes d'interaction descriptible par le formalisme.

Une dernière précision : qu'en est-il du rapport entre physique quantique et physique classique ? Du point de vue des relations de Heisenberg, elles semblent en contradiction totale. La mécanique classique décrit précisément un système en donnant des valeurs uniques et non un spectre de valeurs possibles, à la position et à l'impulsion. En réalité, ce n'est là qu'une approximation, et tout objet, même macroscopique, obéit aux inégalités de Heisenberg et à la mécanique quantique. Comment déterminer la limite à partir de laquelle on peut décrire classiquement un système ? Cette limite ne se confond pas avec une échelle naïve de la « taille » des systèmes : la distinction entre domaines quantique et classique ne peut pas être identifiée à celle du microscopique et du macroscopique. La limite est définie de la façon suivante : le caractère quantique peut être négligé quand le produit des incertitudes, sur la position et l'impulsion, liées aux appareils de mesure, est très grand devant la limite imposée par les inégalités. Sachant que la constante de Planck est de l'ordre de 10^{-34} , on peut facilement se convaincre que la plupart des phénomènes que nous observons peuvent être décrits classiquement. Considérons ⁴, par exemple, une bille de flipper de 30 g ; sa position étant connue, disons à 0,1 mm près, et sa vitesse à 1mms^{-1} près. Le produit des incertitudes expérimentales est alors d'environ : $\Delta x \cdot \Delta p = 3 \cdot 10^{-25} \times h$. On comprend que les caractéristiques quantiques importent peu à cette échelle.

Le principe de superposition...

Le principe de superposition est le premier postulat de la théorie quantique dans le formalisme général de Dirac. Il énonce que « l'état d'un système est entièrement défini, à chaque instant, par un élément d'un espace de Hilbert approprié ⁵ ». Cela signifie que toute superpo-

4. Pour l'exemple : J.-M. LEVY-LEBLOND, F. BALIBAR, *Quantique*, *op. cit.*, p. 115.

5. P. DIRAC, *The Principles of Quantum Mechanics*, Oxford University Press, 1958, la formulation donnée ici est empruntée à J.-L. BASDEVANT, *Mécanique quantique*, Ellipses, 1986.

sition linéaire d'états de l'espace constitue encore un vecteur d'état possible (aux conditions de normalisation près). Nous voudrions ici faire comprendre comment ce principe peut être conçu comme au centre du réseau de difficultés posées par la mécanique quantique.

L'un des comportements quantiques les plus connus, et dont ce principe permet de rendre compte, est le *phénomène d'interférence*. Ce dernier est le plus souvent illustré au moyen de l'expérience de pensée des fentes de Young. Cette expérience, caractérisant les phénomènes d'interférence, a longtemps joué le rôle d'« expérience cruciale » quant à la détermination de la nature du système observé ⁶. La physique admettait alors deux types de systèmes : les ondes et les particules. Or, précisément, les systèmes quantiques se caractérisent par la mise en cause de cette distinction, présentant à la fois des aspects corpusculaires et ondulatoires. Mais autant abandonner un vocabulaire reconnu comme inadéquat.

L'essentiel de cette expérience est que si l'on envoie les « particules » une à une, elles se répartissent sur l'écran récepteur à la manière de balles de tennis, mais que si on prolonge l'expérience assez longtemps, des interférences apparaissent, comme dans le cas d'une onde. Mieux, si on ferme successivement chacun des trous, on obtient deux distributions sur l'écran conformes à nos attentes, mais si on ouvre les deux trous, la distribution n'est pas la somme des deux premières, comme c'est le cas en physique classique ⁷. Le principe de superposition intervient alors pour justifier cette nouvelle courbe. Si en effet ψ_1 et ψ_2 sont respectivement les vecteurs d'état des systèmes lorsqu'un trou ou l'autre est ouvert, alors la probabilité de présence est donnée respectivement par le module au carré de ψ_1 et de ψ_2 . Mais dans le cas où les deux trous sont ouverts, cette probabilité est donnée par le carré du module de la somme, qui n'est pas nécessairement égale à la somme des carrés des modules :

$$|\psi_1 + \psi_2|^2 \neq |\psi_1|^2 + |\psi_2|^2$$

Peu de mathématiques suffisent en effet pour se souvenir que le développement d'une somme au carré comporte un troisième terme : $(a + b)^2 = a^2 + b^2 + 2ab$. Ce troisième terme rend compte des interférences : pouvant être négatif, il peut compenser les deux carrés et annuler la probabilité de présence en certains points. On tire en général comme conclusion de la présentation de l'expérience de Young qu'on ne peut pas dire que la particule est passée par tel ou tel trou

6. Ceci depuis les expériences de Fresnel « démontrant » (de façon provisoire, comme toujours en physique) le caractère ondulatoire de la lumière, contre la théorie corpusculaire due à Newton.

7. Cette expérience et ses surprenants résultats sont très bien exposés dans R. FEYNMAN, *Cours de Physique*, vol. 3, *Mécanique quantique*, InterÉditions, ch. 1.

(les deux étant ouverts), ni non plus par les deux. Il faut donc penser d'une manière nouvelle le comportement quantique. Et c'est la notion de la superposition qui est au cœur de ce nouveau mode d'être. Voyons donc ce que peut signifier le principe.

Dire que toute combinaison linéaire de vecteurs d'état est également un vecteur d'état (à condition qu'il soit normalisé), c'est donner à la théorie son caractère spécifiquement *probabiliste*. En effet, les seuls vecteurs offrant une probabilité égale à 1 ou 0 sont respectivement les vecteurs propres d'une observable et ceux d'une observable compatible à la première. Pour fixer les choses, ces vecteurs définissent en quelque sorte les axes de coordonnées d'un repère. Ils correspondent aux résultats de mesure possibles. Le principe dit alors que non seulement tous les vecteurs appartenant aux *droites définies par les deux vecteurs de base* (sous espaces engendrés respectivement par chacun des vecteurs propres) mais aussi *tous les vecteurs de l'espace engendré* par l'ensemble des vecteurs propres, sont des vecteurs représentant des états possibles. Si donc on envisage un espace à deux dimensions, les vecteurs d'état possibles ne sont pas seulement ceux appartenant aux axes de coordonnées, mais tous les vecteurs du plan. Les vecteurs étant normalisés, et orthogonaux deux à deux d'une part, les amplitudes de probabilité étant données par les coordonnées d'autre part, on doit vérifier, en vertu du seul « théorème de Pythagore » valable pour tout espace vectoriel muni d'un produit interne, que

$$\begin{array}{l} \text{si} \quad \Psi = \gamma_1 \psi_1 + \gamma_2 \psi_2 \\ \text{alors} \quad |\gamma_1|^2 + |\gamma_2|^2 = 1. \end{array}$$

Par conséquent, on a une représentation cohérente, puisqu'on obtient pour les probabilités, si aucun des γ_i n'est nul, $(p_1, p_2) \in]0, 1[$.

Mais l'innovation réside bien dans le fait de considérer *une somme pondérée de vecteurs propres comme un vecteur d'état*. En effet, si l'on voulait conserver le déterminisme, et faire de la description probabiliste l'expression d'une ignorance de notre part, on ne devrait pas accepter les vecteurs « composés » comme vecteurs d'état, mais seulement les vecteurs propres. Prenons l'exemple d'une balle qui tombe d'un conduit dans différents trous au travers d'un réseau de plots⁸. La description de la balle peut se faire par une distribution de probabilité liée aux propriétés de symétrie du dispositif. Mais en aucun cas une description déterministe n'envisagera que la balle puisse être dans un état de superposition : bien au contraire, la balle est toujours considérée comme étant dans un seul état, bien que nous

8. Nous suivons ici R. I. G. HUGUES, *The Structure and Interpretation of Quantum Mechanics*, Cambridge, Cambridge University Press, 1989, p. 93 sq.

ignorions lequel (parmi les différents états possibles), pour de simples raisons de complexité de calculs. *En principe*, si nous avons tous les éléments en main, nous *pourrions* faire tous les calculs et déterminer la trajectoire propre de la balle en fonction des conditions initiales, ainsi que le trou dans lequel elle tombera finalement. C'est pourquoi l'état de la balle sera décrit au moyen d'une somme pondérée, non pas de vecteurs propres, mais de projecteurs. Autrement dit, il n'est pas impossible en principe de rendre compte de l'expérience de la balle en termes déterministes. La description probabiliste n'est aucunement ici intrinsèque, elle représente bien plutôt notre degré d'ignorance du véritable état dans lequel se trouve la balle considérée. L'interprétation en termes d'ignorance est l'interprétation classique des probabilités. En quoi les probabilités assignées aux résultats de mesure possibles par la physique quantique diffèrent-elles radicalement de ce point de vue classique ? Dans un premier temps, il ne semble pas possible de distinguer empiriquement un état de superposition (aux probabilités intrinsèques) d'avec un mélange statistique (interprétable en termes d'ignorance). En effet, puisque chaque projecteur correspond de façon univoque à un résultat de mesure possible, les coefficients sont les mêmes dans les deux cas. *L'expérience* sur un seul système *ne permet donc pas de distinguer entre un état « mélangé » et une superposition*, puisque les probabilités seront les mêmes. Pourtant, *conceptuellement*, la *superposition n'est pas l'expression de notre seule ignorance* et ne peut être rabattue sur des probabilités classiques. C'est là que le formalisme induit des concepts vraiment nouveaux et problématiques. La superposition est donc *conceptuellement fondamentale*, mais il faudra déterminer comment on peut, *empiriquement*, distinguer un état mélangé d'une superposition. On verra que c'est là qu'entrent en jeu *l'incompatibilité* des opérateurs et les relations de Heisenberg.

Voyons donc maintenant comment les problèmes de la mesure, des relations de Heisenberg sont liés à la superposition.

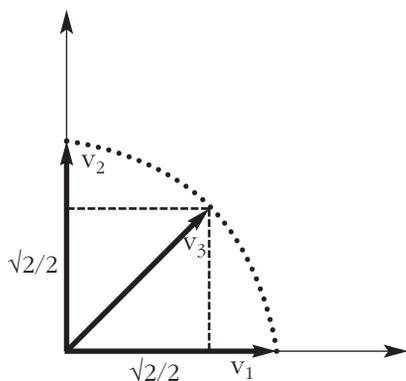
...au cœur des problèmes de la mécanique quantique

Le lien de la superposition avec le problème de la mesure est direct. En effet, si le système à mesurer est dans un état propre de l'opérateur, le résultat de la mesure sera certain. C'est donc seulement dans le cas où le système est en état de superposition que le postulat de la réduction du paquet d'onde intervient. La physique classique décrivant les systèmes comme ayant toutes leurs caractéristiques parfaitement bien définies en chaque instant, la mesure ne consiste qu'à faire correspondre à la valeur numérique définie d'une grandeur physique, un état défini et directement observable de l'appareil de mesure. La physique quantique ne donnant qu'un spectre de valeurs possibles, un postulat

supplémentaire est nécessaire pour rendre compte de la projection discontinue sur l'une de ces valeurs. Enfin, c'est le statut spécifique de la superposition, par rapport à l'interprétation classique des probabilités en termes de mélange, qui fait de la mesure quantique un problème. Prendre au sérieux le principe de superposition, c'est dire en effet que la mesure ne découvre pas un état réel que nous ignorions jusqu'alors, mais qu'elle définit ou même crée un nouvel état pour le système. Nous en revenons donc toujours au problème du statut, spécifique ou non, qu'il faut accorder à la superposition.

Venons-en aux rapports qu'entretiennent superposition et relations de Heisenberg. On peut considérer comme première l'une ou l'autre de ces deux caractéristiques des systèmes quantiques. Dirac considérait la première comme l'innovation la plus importante, et pourtant, on peut penser que le formalisme général de la théorie repose sur la mise en avant de la non-commutativité, donc des observables incompatibles et finalement des relations de Heisenberg. L'une comme l'autre de ces propriétés des systèmes quantiques peuvent donc être considérées comme fondamentales. Ceci pour deux raisons. D'abord parce que chacune implique, à elle seule, le caractère probabiliste spécifique de la théorie. On l'a vu pour le principe de superposition, mais la possibilité pour des grandeurs physiques A et B d'être incompatibles, implique également qu'il y a des états pour lesquels la probabilité de résultat de certaines mesures est différente de 0 et de 1. Cela dérive des rapports de transformations existant entre deux opérateurs incompatibles. Ensuite, parce que les deux principes sont indépendants logiquement : aucun ne peut être dérivé de l'autre. On pourrait envisager aussi bien une théorie comportant des opérateurs incompatibles, mais interdisant que toute superposition d'états propres soit encore un état propre, qu'une théorie autorisant les superpositions, sans pour autant posséder d'opérateurs incompatibles. Et pourtant, une difficulté apparaît dans ce dernier cas.

En effet, sans observables incompatibles, le principe de superposition n'aurait pas de contenu empirique. C'est-à-dire que nous n'aurions pas les moyens expérimentaux de distinguer les états de superposition d'états « mélangés ». Considérons un opérateur A n'admettant que deux vecteurs propres v_1 et v_2 pour les deux valeurs propres α_1 et α_2 . Soit maintenant un vecteur v_3 une somme pondérée de ces deux vecteurs : $v_3 = \sqrt{2}/2 v_1 + \sqrt{2}/2 v_2$. Ce vecteur est en état de superposition par rapport à A. La théorie prédit alors que les probabilités d'obtenir comme résultat de mesure α_1 ou α_2 sont égales et valent 1/2. Le problème est alors qu'une analyse en termes classiques d'ignorance (le système est en réalité dans un seul état, qui est encore inconnu), prédit exactement les mêmes probabilités de mesure : on a une chance sur deux, pour des raisons de symétrie de « découvrir » le système dans



l'état 1 ou l'état 2. Comment la superposition peut-elle alors revêtir son caractère spécifique ? En faisant intervenir une seconde observable B, qui soit incompatible avec A (voir figure).

Le fait que B soit incompatible avec A se traduit par la possibilité, pour v_3 d'être un de ses vecteurs propres. Essayons de nous représenter ceci géométriquement (avec les simplifications requises,

puisque en réalité nous travaillons sur des nombres complexes). Considérons un plan, et une base orthonormée de ce plan, définie par v_1 et v_2 (voir figure). Le vecteur v_3 est alors le vecteur unitaire porté par la bissectrice de l'angle formé par v_1 et v_2 . Il se situe donc à 45° de l'un et de l'autre. Chaque observable est caractérisée par une base propre de ce type. Or, si toutes les observables étaient compatibles, cela se traduirait par le fait que deux vecteurs propres de deux bases de deux opérateurs différents seraient nécessairement orthogonaux. Revenons donc à notre figure : si toutes les observables sont compatibles, toutes les projections de v_3 , c'est-à-dire toutes les coordonnées de ces vecteurs, ou encore toutes les probabilités de résultat de mesure sur toutes les observables sont différentes de 0 et de 1. Il n'y a donc pas, dans ce cas, de vecteur d'état qui puisse être en même temps indéterminé pour une observable, et déterminé pour une autre. Or, précisément, l'incompatibilité de deux observables se traduit géométriquement par le fait que deux vecteurs de leurs bases respectives ne sont pas orthogonaux, mais « obliques ». Ainsi, si A et B sont incompatibles, v_3 peut être un vecteur propre de B, bien qu'en état de superposition pour A. Sur notre figure, il suffit que les vecteurs de la base de vecteurs propres de B soient obtenus par rotation de 45° par rapport à la base de vecteurs propres de A (axe en pointillé sur la figure). Alors, il peut bien être considéré comme un vecteur d'état possible, et le principe de superposition peut prendre toute sa spécificité. Du point de vue des probabilités, les deux interprétations sont alors en conflit, puisque la théorie admettant le principe de superposition assigne pour probabilités de mesure sur B soit 1 soit 0, tandis que la théorie classique donne des valeurs strictement comprises entre 0 et 1. Suivant Hugues, on peut conclure que « les principes d'incertitude et de superposition sont indépendants conceptuellement mais non épistémiquement ⁹. ». Sans

9. *Ibid.*, p. 111, auquel nous empruntons cette analyse.

incompatibilité, il n'est donc pas possible de distinguer un état de superposition d'un état « mélangé ». Par conséquent, sans incompatibilité, il est possible d'interpréter la superposition en termes d'ignorance. C'est ainsi que le problème de savoir si la mécanique quantique peut ou non être considérée comme incomplète, et si une théorie plus complète pourrait interpréter classiquement les phénomènes considérés, *ne peut être « mis en expérience » qu'en faisant intervenir des observables incompatibles.*

En résumé, nous avons un formalisme qui décrit les phénomènes quantiques d'une façon complètement nouvelle. La théorie fournit de son côté des résultats exceptionnellement bons en matière expérimentale. Les difficultés ne sont donc pas directement celles de la théorie physique, mais bien de son interprétation. Mais ce n'est pas là dire qu'on puisse faire l'économie de ces difficultés : le formalisme, par lui-même, semble imposer une épistémologie et des concepts physiques contraires à ceux de la mécanique classique. L'état d'un système n'est donné que par la *distribution probabiliste des résultats de mesure possibles*. Mais la spécificité de ce formalisme est de la donner comme intrinsèque. Du point de vue formel, c'est la possibilité de la *superposition* qui induit ce trait novateur. Du point de vue interprétatif, cela correspond à une forme de *probabilisme fondamental*. Celui-ci est au centre des questions liées au formalisme : le problème de la mesure, sur lequel nous ne nous attarderons pas, en dérive, et la possibilité pour des grandeurs physiques d'être incompatibles, permet d'en interroger empiriquement le statut véritable. Toute interprétation de la physique quantique doit rendre compte du statut de cette description probabiliste, qui ne peut pas être comprise classiquement en termes d'ignorance. Pour finir, nous allons tâcher de donner un aperçu des différentes interprétations qui ont été développées au cours du siècle dernier.

Trois points de vue possibles sur ces problèmes

Trois points de vue ¹⁰ sont globalement possibles. Ils tentent, chacun à leur manière, de rendre raison de la révolution conceptuelle qu'apporte la mécanique quantique. Ils doivent donc prendre position

10. Ceci est une présentation très schématique. En réalité, il faudrait évoquer trois autres interprétations possibles (modales, sans postulat de réduction — *no collapse interpretation* — et en termes de mondes possibles). L'espace ici imparti ne permet cependant pas d'en faire un traitement correct. Concernant les interprétations modales, on pourra aller voir les travaux de D. Dieks et M. Dickson. Pour les théories refusant le postulat de réduction, voir ceux de G. C. Ghirardi et A. Rimini. Enfin, pour les interprétations en termes de mondes possibles (qui réinvestissent les réflexions de Leibniz), on pourra consulter les travaux de H. Everett et de l'« école » d'Oxford, en particulier D. Wallace. Ces dix dernières années ont vu également se développer une interprétation nouvelle, liée au développement de l'information quantique, mais savoir dans quelle mesure elle constitue un renouveau conceptuel ou non est encore l'objet de débats.

sur le statut des probabilités, le processus de mesure, la superposition et l'incompatibilité de certaines observables. Ils se distingueront globalement selon qu'ils conserveront ou non l'épistémologie et/ou les concepts de la physique classique. À chaque fois, la question sera celle de la spécificité des phénomènes quantiques. En particulier, conserver l'épistémologie *et* les concepts classiques, c'est refuser cette spécificité et interpréter la théorie comme incomplète.

L'interprétation dite « orthodoxe »

La façon dite « orthodoxe » d'interpréter la théorie comprend l'interprétation minimale qui sert le plus souvent à présenter le formalisme. Elle entretient des rapports ambigus avec ce qu'on a coutume d'appeler « l'interprétation de Copenhague ¹¹, ». En réalité cette appellation ne correspond à peu près à aucune réalité unifiée et simple. Il faudrait au moins distinguer les réflexions des différents pères fondateurs de la mécanique quantique, qui s'opposent bien plus qu'elles ne constituent une quelconque unité. Il faut encore moins confondre ces dernières avec la façon dont leurs idées ont été simplifiées, leurs interrogations, et les immenses débats en découlant oubliés, et leurs propositions mutilées et dogmatisées. Pourtant, on peut chercher à dégager quelques traits caractéristiques d'une interprétation « à la Bohr », sans prétendre à aucune validité historique ni entrer dans les détails d'une pensée complexe qui mériterait une étude pour elle-même. Bohr est en effet le plus souvent invoqué comme autorité pour l'interprétation dite « orthodoxe », bien que ce « Bohr »-là n'ait pas grand-chose à voir avec le Bohr historique. Cependant, vu l'hégémonie de cette interprétation, il est nécessaire d'en donner les caractères les plus généraux. L'équation de Schrödinger est interprétée comme donnant les probabilités des résultats de la mesure. La question de la spécificité et de la nature du probabilisme quantique n'est pas posée en tant que telle. Les interrogations sur ce que sont les choses de la nature, en dehors de l'observation que l'on en fait, sont en effet évacuées comme illégitimes épistémologiquement. Les lois n'ont pas de caractère ontique et toute recherche plus avant sur la nature prétendument profonde de la réalité est dénoncée comme métaphysique, au sens où toute « métaphysique » est un état pré-scientifique que les progrès de la connaissance sont voués à disperser. La science n'a pour but légitime que de prédire des résultats de mesure.

Mais l'analyse va plus loin que ce simple instrumentalisme. Elle comprend une véritable réflexion sur le statut du langage et des concepts de la physique. Affirmant la nécessité de conserver les

11. Voir à ce sujet le travail de C. Chevalley.

concepts classiques, tout simplement parce qu'ils sont les seuls à la portée de notre esprit, elle développe une forme de perspectivisme. Dire que certaines caractéristiques d'un système sont sous-déterminées par la théorie, c'est commettre une erreur de perspective : les observables auxquelles la théorie ne donne pas de valeur précise ne sont pas même définies. Ce n'est pas qu'elles sont indéfinissables parce qu'inconnaissables dans le cadre de la théorie, mais au contraire inconnaissables parce qu'indéfinissables. Seules sont définies les observables liées à un protocole précis de mesure, et auxquelles la théorie donne une valeur elle-même précise. L'interprétation prend ici une couleur positiviste, au sens où elle confère un rôle essentiel à l'expérience : les choses ne sont connaissables que dans la mesure où elles sont observables, c'est-à-dire mesurables dans un protocole d'expérience précis. Il est vain de prétendre trouver un point de vue depuis lequel une vision globalisante et unifiée de la réalité soit possible. C'est en cela que l'épistémologie classique doit être réformée. Deux aspects différents d'une telle idée peuvent être distingués. D'un côté, c'est notre rapport au réel qu'il faut repenser. En particulier, il n'est plus possible de considérer l'observateur humain comme extérieur à l'expérience. Mais de l'autre, les concepts classiques sont conservés et réinterprétés comme autant de points de vue possibles sur une réalité quantique aux multiples facettes. Comment concilier cela avec la complétude de la théorie et éviter que l'interprétation conduise à une limitation un peu arbitraire de notre connaissance ?

La réponse à cette question passe par la thèse difficile de la *complémentarité*. L'idée que deux observables *incompatibles* sont *complémentaires* signifie que si elles ne peuvent ni ne doivent être définies et précisées simultanément, elles constituent cependant, ensemble, la totalité des points de vue possibles sur le phénomène quantique. Deux observables incompatibles complémentaires nous donnent donc le tout de ce que nous pouvons savoir sur un système. On peut considérer cette interprétation soit comme refusant d'affronter les problèmes et limitant dogmatiquement les capacités de connaissance de l'homme, soit comme une façon de remettre la science et son auteur à leur place, modeste mais sûre, loin de toute considération « métaphysique ». En tous les cas, elle ne saurait être réduite à un simple positivisme instrumentaliste. Si limitation de la connaissance il y a, et par conséquent si la mécanique quantique est en un sens « incompréhensible », c'est en raison d'arguments philosophiques. Ce qui est central, c'est le privilège accordé aux concepts classiques. C'est une réforme de philosophie du langage qu'il faut engager. Mais il reste un vrai problème de cohérence en revanche quand il s'agit de déterminer la frontière entre les domaines classique et quantique. En particulier, l'appareil de

mesure est classique quand il est « observant », mais susceptible d'une description quantique s'il est à son tour observé. Quoi qu'il en soit, on peut certainement qualifier cette première interprétation de point de vue *épistémologique* sur la mécanique quantique, dans la mesure où seule *l'application* des concepts se voit régulée de manière nouvelle.

Le point de vue des potentialités

Le second point de vue prend plus au sérieux les caractères nouveaux du formalisme. D'abord, la description en termes de probabilités est reconnue comme fondamentale. Les probabilités ne sont pas seulement des probabilités de mesure, mais plus profondément, elles sont l'expression formelle de *potentialités*. Les tenants de cette interprétation s'appuient sur une relecture de la théorie aristotélicienne de la puissance et de l'acte. Ainsi l'état de superposition n'est-il pas seulement une description commode, mais un *nouveau mode d'être* qui ne saurait être réduit à aucun de nos concepts classiques. De la même façon, deux grandeurs physiques incompatibles se trouvent ontiquement régies par les inégalités de Heisenberg. Les concepts classiques sont inaptes à rendre compte des phénomènes quantiques. Ils peuvent, comme dans la première interprétation, être considérés comme des points de vue sur le phénomène, mais ces points de vue, trop restreints, doivent être abandonnés, au profit de nouvelles conceptions. C'est ainsi que la contradiction entre les descriptions en termes d'onde et de particule peut être comparée à celle qu'on pourrait voir entre deux descriptions d'un cylindre, en termes de cercle et de rectangle, selon qu'on le regarde suivant son axe de symétrie (on en voit alors seulement la section circulaire) ou suivant la perpendiculaire à cet axe (on en voit alors qu'une projection rectangulaire)¹². Contre l'idée que de telles conceptions ne sont pas accessibles à l'homme, parce qu'en contradiction avec les concepts classiques, on peut avancer que les idées d'espace comme infini, homogène et isotrope, de point matériel ou d'attraction universelle à distance n'ont rien de « naturel », et qu'elles ne paraissent « classiques » qu'au terme de plusieurs siècles d'assimilation douloureuse de la physique moderne. Il n'est donc pas légitime d'interdire, *en principe*, la possibilité de réformer notre appréhension du monde. Ainsi faut-il considérer que la superposition et la corrélation des indéterminations peuvent se voir conférer un caractère réaliste.

Mais une difficulté surgit ici : peut-on développer une interprétation réaliste des potentialités ? Une analyse en termes de relations possibles

12. Voir J.-M. LEVY-LEBLOND, F. BALIBAR, *Quantique, op. cit.*, p. 67 et J.-M. LEVY-LEBLOND, *Aux contraires...*, *op. cit.*

n'est-elle pas nécessairement idéaliste? On peut distinguer deux aspects du réalisme. Le premier affirme qu'il existe un monde extérieur objectif (réalisme du monde), indépendamment de la conscience humaine. Le second que la physique en décrit les propriétés réelles (réalisme des lois). Redhead¹³ répond à l'accusation d'idéalisme appliquée aux potentialités sur ces deux points. Premièrement, la description probabiliste n'a aucunement besoin d'inclure la conscience humaine. Tout peut donc fonctionner sans l'homme. L'interprétation n'est donc pas idéaliste au sens de Berkeley. Deuxièmement, les potentialités, bien que manifestées par l'expérience seule, peuvent être réelles, au même titre que la fragilité de la fenêtre, qui n'est manifeste que quand on lance une pierre au travers. Il est ainsi possible de développer une interprétation réaliste des potentialités, au sens où ces dernières sont bien des « propriétés¹⁴ » des systèmes, qui, de plus, sont indépendantes de l'esprit humain.

Mais reprenons : nous avons vu quels statuts sont conférés aux probabilités, à la superposition et aux relations d'indétermination. Qu'en est-il de la mesure? Celle-ci est ici comprise comme interaction, modification du système. Elle actualise une des potentialités, et définit une valeur fondamentalement floue, caractérisée par une certaine « extension ». Comprenons bien que la grandeur physique n'a pas de valeur précise avant la mesure. Si donc la théorie doit être complétée, ce n'est pas en termes de variables cachées qui annihileraient la spécificité des probabilités quantiques, mais en essayant d'intégrer au formalisme le processus de mesure. L'idée serait alors d'englober la mécanique quantique dans une théorie plus globale, dont elle ne serait qu'un cas particulier. Une telle théorie formaliserait le processus de la mesure. Par conséquent, elle devra être non-linéaire. On retiendra que ce deuxième point de vue considère la description quantique d'un système comme complète, et accorde un statut spécifique aux probabilités quantiques. Elle prescrit une réforme de nos conceptions, donnant à la description probabiliste un sens ontique¹⁵.

L'interprétation dite des « variables cachées » ou « supplémentaires »

Le troisième type d'interprétation développe les positions strictement contraires à celles exposées ci-dessus. Il part du refus d'accorder un caractère spécifique ou mystérieux à la mécanique quantique.

13. REDHEAD, *Incompleteness, Nonlocality, and Realism, A Prolegomenon to the philosophy of quantum Mechanics*, Clarendon, 1987, p. 48.

14. En un sens que beaucoup de philosophes tentent encore de déterminer.

15. Remarquons à ce stade qu'un champ de la philosophie des sciences s'est développé autour de la métaphysique des « dispositions », considérées comme les éléments fondamentaux constituant la réalité. On pourra consulter par exemple les travaux de N. Cartwright, ou, en France, de Max Kistler sur ce point.

Par conséquent, il refuse aussi de se plier à l'une ou l'autre des exigences de réforme, épistémologique (première interprétation), ou conceptuelle (deuxième interprétation). Les probabilités sont interprétées en termes classiques d'ignorance sur le système. Ainsi l'état de superposition n'est-il pas un nouveau mode d'être, mais une description commode traduisant notre méconnaissance. Toutes les grandeurs physiques ont une valeur unique et précise. Le fait que la mesure ne nous donne qu'une seule valeur suffit à garantir ce fait. La mesure est donc le moyen par lequel nous augmentons notre connaissance sur le système : elle ne modifie pas le système, ne provoque aucune détermination supplémentaire, mais découvre une valeur préexistante, quoiqu'inconnue. On aura donc compris que la mécanique quantique n'est pas considérée dans ce cadre comme complète. L'interprétation est ici évidemment réaliste, au double sens déjà mentionné. Mais le point crucial n'est pas là : nous avons vu en effet que l'interprétation en termes de potentialité est également cohérente avec les deux aspects du réalisme. Le conflit est donc ailleurs. Il se noue autour de la question de la spécificité des phénomènes quantiques. Toute interprétation en termes de variables supplémentaires tente de rabattre l'inconnu sur le connu, le quantique sur le classique. C'est que la nature de la physique est donnée par la physique classique. Une théorie physique doit pouvoir être en particulier à la fois déterministe et locale. Le modèle est dans ce cadre celui donné par la physique des champs. Le xx^e siècle a permis de déterminer strictement dans quelle mesure une telle interprétation en termes de variables cachées est possible. Le théorème de Bell (1962), et les expériences qui ont suivi, en particulier celle de l'équipe d'Alain Aspect en 1982, ont pu montrer qu'une théorie à la fois locale et réaliste n'est pas possible. C'est un sujet qui a aussi fait couler beaucoup d'encre, et il n'est pas possible de rapporter l'ensemble du débat ici. Signalons malgré tout qu'une interprétation à variables cachées (non-locale) a été mise en œuvre par D. Bohm, et menée à bien par Goldstein. Cette interprétation reproduit exactement les prédictions de la mécanique quantique orthodoxe. Elle n'est cependant qu'assez peu connue des physiciens eux-mêmes. Du point de vue philosophique cependant, il est intéressant de considérer qu'une telle interprétation est possible.

Conclusion : la science ouverte à l'interprétation

La présentation que nous avons faite ici ne prétend pas à l'exhaustivité. Elle espère seulement donner un aperçu du champ de la philosophie de la physique quantique. La philosophie de la physique est guidée par la conviction que les théories scientifiques demandent une

interprétation. Ceci non pas au sens où le positivisme logique l'entendait. Il ne s'agit pas de distinguer une axiomatique d'avec des règles de correspondance permettant de lier les termes théoriques avec les termes d'un hypothétique langage observationnel. Il s'agit bien plutôt, pour reprendre une expression de Bas van Fraassen, de se poser la question de savoir ce que pourrait être le monde s'il est ce que la théorie dit qu'il est. La théorie quantique use des probabilités : mais que sont les probabilités ? La théorie introduit un indéterminisme fondamental : mais qu'est-ce que l'indéterminisme exactement ? Elle induit enfin une forme de holisme, en formalisant des systèmes complexes irréductibles à la somme de leurs parties : mais qu'est-ce que le holisme ? Voici le genre de questions que peuvent se poser les philosophes de la physique. Ces derniers sont alors mus par une conviction et un espoir : la conviction que la science ne dicte pas totalement la manière dont on peut la comprendre, et l'espoir que leurs recherches pourront au moins déterminer ce qui peut être sujet à interprétation et ce qui doit au contraire constituer le fond commun de toute interprétation possible.

Soazig LE BIHAN

Ancienne élève du lycée Chateaubriand de Rennes, Soazig Le Bihan, normannoise, agrégée de philosophie, poursuit des études en physique et prépare une thèse de doctorat sur la philosophie de la physique quantique au laboratoire de Philosophie et histoire des sciences – Archives Poincaré de Nancy. Monitrice à l'université Paris VII-Jussieu, elle anime divers séminaires à l'École normale supérieure.