

Chapitre 6 – Synthèse comparative des interprétations

Les trois interprétations de la mécanique quantique présentées dans les précédents chapitres ont de quoi susciter de grandes interrogations. Comment est-il simplement possible que des images du monde si différentes puissent être faites à partir de la même théorie ? Par ailleurs, pourquoi les spécialistes sont-ils toujours divisés aujourd'hui sur la *bonne* interprétation, plusieurs décennies après les premiers débats ? L'une d'entre elles n'est-elle pas objectivement meilleure que les autres ? Ce dernier chapitre propose de répondre à ces questions, à travers une comparaison critique des interprétations quantiques présentées.

1. Des interprétations quantiques si différentes, mais équivalentes

a. Synthèse des caractéristiques des interprétations quantiques

Avant d'étudier l'équivalence entre les interprétations quantiques, synthétisons leurs caractéristiques respectives en un tableau.

Caractéristique	Interprétation orthodoxe	Interprétation bohémienne	Interprétation des mondes multiples
Formulation mathématique de la théorie	équation de Schrödinger et postulat de projection	équation de Schrödinger et équation-pilote	équation de Schrödinger
Entités composant le monde	systèmes quantiques et objets macroscopiques	fonction d'onde et positions des particules	fonction d'onde, avec mondes quasi-classiques
Objet des prédictions de la théorie	résultats de mesures (toute grandeur physique)	positions des particules	paris des agents
Interprétation des probabilités	objective	subjective	objective
Déterminisme du monde ?	indéterministe	déterministe	déterministe

b. Des faits différents

Certaines différences fondamentales entre les interprétations quantiques doivent être soulignées. Tout d'abord, elles ne reconnaissent pas les mêmes faits dans le monde, au sujet d'une même expérience. Lorsque l'une considère qu'il y a un résultat à la mesure de telle quantité, il peut arriver qu'une autre dise qu'il n'existe pas de fait à propos du résultat !

Illustrons cela avec la mesure du spin d'un électron par un appareil approprié (*cf.* chap. 4). Supposons qu'un électron entre dans l'appareil avec un état de spin $|+\rangle + |-\rangle$ (c'est-à-dire que les probabilités de mesurer « + » ou « - » sont chacune de 50 %), et supposons que le résultat de la mesure s'avère être « + ». Selon l'interprétation orthodoxe, il existe un fait à propos du résultat de mesure : dans l'image du monde orthodoxe, il existe un résultat, qui, en l'occurrence, vaut « + ». L'interprétation bohémienne considère aussi qu'il existe un fait à propos de ce résultat, étant donné qu'il existe une position finale de l'électron. Mais selon l'interprétation des mondes multiples, il n'existe pas de fait à propos du résultat de la mesure. En effet, l'ensemble constitué de l'électron et de l'appareil est décrit par une superposition des deux résultats, $|+\rangle|+\rangle + |-\rangle|-\rangle$. L'univers everettien comprend à la fois un monde dans lequel le résultat est « + » et un autre dans lequel le résultat est « - ». Pour l'univers dans son ensemble, il n'existe pas *un seul* résultat et en ce sens il n'existe pas de fait à propos du résultat. Ainsi, contrairement au sens commun, un everettien peut affirmer devant un physicien qui observe un appareil de mesure

« il n'existe pas de fait à propos de ce résultat ». En revanche, l'interprétation des mondes multiples ne nie pas qu'il existe des faits *relativement* à un monde particulier. En l'occurrence, dans le monde décrit ici, le résultat de mesure est « + ».

Ainsi, les interprétations quantiques ne reconnaissent pas les mêmes faits au sein d'une même expérience. Il faut prendre la mesure de la nouveauté de cette caractéristique des interprétations de la mécanique quantique : jamais, dans aucune autre théorie physique, les images du monde proposées pour une même théorie n'ont été aussi différentes entre elles. S'il existe des interprétations multiples d'autres théories, elles s'accordent au moins sur l'existence de faits expérimentaux. Par exemple, la mécanique classique admet plusieurs interprétations, l'une décrivant un monde où existent des forces (interprétation newtonienne), une autre un monde où existe de l'énergie (interprétation hamiltonienne). Néanmoins, toutes deux sont d'accord, par exemple, sur le fait qu'une particule est arrivée au temps t à la position x avec la vitesse v . Le seul désaccord est qu'elles emploient naturellement des variables différentes pour noter ce fait.

En mécanique quantique, en revanche, il n'y a pas d'accord sur des faits bruts ou des données brutes que la théorie devrait prédire ou interpréter. Ce qu'une interprétation considère comme une donnée brute, par exemple le résultat d'une mesure selon l'interprétation orthodoxe, n'est pour une autre qu'une illusion qui mérite d'être expliquée, par exemple à partir de l'existence d'une multiplicité de mondes. Les interprétations quantiques ne sont pas simplement des images du monde qui viennent rendre compte de certaines apparences empiriques données. Les faits dont chaque interprétation rend compte sont propres à elle et définis par elle.

c. Des prédictions différentes, sans neutralité possible

Une autre caractéristique particulière des interprétations quantiques est que leurs prédictions ne portent pas sur les mêmes objets, ainsi que le rappelle le tableau p. 30. Autrement dit, les probabilités prédites par la théorie ne réfèrent pas aux mêmes choses dans le monde, selon l'interprétation adoptée.

Pour poursuivre avec l'exemple de la mesure du spin de l'électron, la prédiction de la théorie porte ou bien sur la valeur du spin (selon l'interprétation orthodoxe), ou bien sur la position de sortie de l'électron (selon l'interprétation de Bohm), ou bien encore sur les paris qu'un agent rationnel fera devant une telle expérience (selon l'interprétation des mondes multiples).

Comme les faits reconnus (et prédits) par la théorie dépendent de l'interprétation adoptée, il n'existe pas de façon neutre de décrire ce sur quoi portent les prédictions de la théorie ou ce que sont les données empiriques auxquelles elles seront comparées. Il n'y a ni faits expérimentaux neutres, ni prédictions neutres, vis-à-vis des interprétations quantiques. Il n'est pas possible d'appliquer empiriquement la mécanique quantique sans faire un choix interprétatif concernant l'objet des prédictions et ce qui constitue un fait expérimental. Ce choix interprétatif peut entrer en contradiction avec des positions défendues par l'une ou l'autre des interprétations. Par exemple, le simple fait de dire, comme on peut le faire couramment, que « le résultat de la mesure est X », peut être en contradiction avec l'interprétation everettienne.

d. Néanmoins, une équivalence empirique

Les interprétations de la mécanique quantique ont été présentées comme étant équivalentes empiriquement. Mais quel sens peut-on exactement donner à cette équivalence empirique, quand leurs prédictions sont aussi différentes ?

Commençons par noter que, si les probabilités portent sur des objets différents, leurs valeurs sont toujours mathématiquement identiques. Par exemple, pour un électron avec un état de spin $| + \rangle + | - \rangle$, toutes les interprétations quantiques donneront les probabilités 50 % et 50 % à la mesure de ce qui

correspond au « + » et au « - »¹.

Comment ces prédictions, qui portent sur des faits différents selon les interprétations, peuvent-elles ensuite être comparées ? Cette question difficile ne semble pas avoir reçu de réponse consensuelle parmi les spécialistes. Un accord existe cependant : les interprétations quantiques sont équivalentes au sens où aucune expérience n'est capable de mettre en défaut l'une de ces interprétations plutôt qu'une autre².

2. Pour ou contre ? Quelques arguments en (dé)faveur de ces interprétations

La mécanique quantique est une théorie physique qui admet plusieurs interprétations, lesquelles dessinent des images du monde radicalement différentes, mais ne peuvent être distinguées empiriquement. Cela signifie qu'aucune expérience réalisable ne permettra jamais de trancher entre, par exemple, l'idée d'un monde déterministe à la Bohm, dans lequel aucun hasard n'intervient dans le cours des événements, ou l'idée d'un monde indéterministe, comme le veut l'interprétation orthodoxe, au sein duquel un hasard fondamental joue un rôle presque à chaque instant. Contrairement à une idée commune, l'expérience ne permettra jamais de trancher la question de savoir si le hasard pur existe ou non dans notre monde (si on prend au sérieux l'image du monde quantique).

Si l'expérience, méthode reine des sciences modernes, ne permet pas de trancher entre les diverses interprétations quantiques, quels sont alors les critères appropriés pour choisir la « bonne » interprétation ? Mais y a-t-il encore seulement une « bonne » interprétation quantique, ou toutes se valent-elles ? Cette dernière section veut apporter un éclairage à ces questions en étudiant les arguments qui ont été avancés³.

a. Cohérence

Les physiciens et les philosophes avancent souvent qu'un critère selon lequel une interprétation quantique devrait être jugé est celui de la cohérence. Cette cohérence peut prendre plusieurs aspects : cohérence interne de l'interprétation elle-même (comme cela a été noté pour l'interprétation orthodoxe, avec le « problème de la mesure »)⁴, ou cohérence externe vis-à-vis d'autres théories ou d'autres positions.

Par exemple, les bohmiens insistent sur le fait que l'interprétation bohmiennne, qui attribue des positions à chaque instant à toutes les particules, est en accord sur ce point avec l'image classique du monde, qui provient des autres théories de la physique, ou avec l'image commune du monde, que nous avons intuitivement vis-à-vis du monde qui nous entoure. A contrario, l'interprétation orthodoxe est en conflit avec ces images du monde, puisqu'elle n'attribue pas de position à une particule à chaque instant.

Certains choisissent une interprétation parce qu'elle s'accorde avec certaines croyances ou certaines positions philosophiques. Plutôt que réviser certaines de leurs croyances à l'aune d'une interprétation

¹ La périphrase un peu floue de « ce qui correspond à... » est utilisée pour désigner un résultat de mesure, puisque les différentes interprétations ne font justement pas porter leurs prédictions sur les mêmes choses.

² Précisons que cela est vrai pour toutes les expériences réalisables, mais pas pour toutes les expériences imaginables. Concernant la démonstration de l'équivalence entre interprétations, une piste envisagée est que les prédictions des interprétations orthodoxes et bohmiennes soient réduites aux prédictions de l'interprétation des mondes multiples, en employant le langage des paris des individus.

³ Certains physiciens préfèrent ne pas se prononcer sur l'image du monde, et affirment refuser de choisir entre les interprétations quantiques. Toutefois, une interprétation de la théorie est bien nécessaire (cf. chap. 2), et une neutralité interprétative n'est pas possible, puisque toute prédiction revient à prendre une position interprétative au moins implicitement (cf. la section précédente de ce chapitre).

⁴ Cf. p. 19.

quantique, ils préfèrent choisir l'interprétation qui s'accorde avec leurs croyances initiales. Par exemple, un partisan de l'indéterminisme dans le monde peut récuser l'interprétation bohémienne sur la base de son déterminisme. Ou un adepte de la métaphysique des mondes possibles (leibnizien ou lewisien) peut se sentir plus proche de l'interprétation des mondes multiples.

b. Simplicité

La simplicité est un autre critère généralement évoqué dans l'argumentation concernant les interprétations quantiques. Par exemple, on remarque que l'interprétation de Bohm repose sur deux équations de base (équations de Schrödinger et pilote), tandis que l'interprétation d'Everett ne se réfère qu'à la première des deux, ce qui la rend plus simple. Mais certains reprochent à l'interprétation d'Everett l'infinité du nombre des mondes qu'elle invoque, ce qui va à l'encontre d'une image simple. L'interprétation d'Everett est-elle finalement plus simple ? Nous pouvons dire en tout cas que l'application d'un critère de choix n'est pas chose aisée.

c. Étendue

Certains reprochent à l'interprétation orthodoxe de la mécanique quantique son manque d'étendue : comme l'interprétation orthodoxe requiert la définition d'un « système » et d'un « observateur » qui lui soit extérieur, le système ne peut pas englober la totalité de l'univers. Ainsi, il n'est pas possible d'étudier l'univers et son évolution avec une lecture orthodoxe de la mécanique quantique. Cela explique certainement pourquoi peu de cosmologistes¹ sont partisans de l'interprétation orthodoxe. À l'inverse, les interprétations bohémienne et everettienne permettent d'appliquer la mécanique quantique à tout l'univers.

d. Fécondité

Dans leur défense d'une interprétation quantique, d'autres préfèrent insister sur sa fécondité, c'est-à-dire sa capacité à susciter de nouvelles découvertes et à étendre la théorie. L'idée sous-jacente est qu'utiliser une autre image du monde, ou employer certaines équations ou paramètres, peut susciter de nouveaux développements, théoriques ou expérimentaux. C'est notamment l'argument initial de Bohm et d'Everett, lorsqu'ils ont proposé leurs interprétations dans les années 1950. Toutefois, ce critère de fécondité est un critère pragmatique, qui concerne les développements futurs de la théorie, et n'intéressera pas celui qui souhaite seulement choisir une image du monde d'après la théorie actuelle.

e. Conclusion

Ces quelques exemples montrent que les critères qui interviennent dans les discussions concernant la meilleure interprétation sont notamment la cohérence, la simplicité, l'étendue, et la fécondité. Ces critères sont justement ceux qui sont généralement utilisés lorsque les scientifiques font des choix à propos des théories, selon l'historien et le philosophe des sciences Kuhn². On peut donc ajouter par rapport à Kuhn que le choix entre des interprétations d'une même théorie, qui sont empiriquement équivalentes, semble se faire selon les mêmes critères que ceux qui président au choix entre des théories différentes.

¹ Les cosmologistes sont les physiciens qui étudient l'histoire de l'univers depuis son origine.

² Au sujet de ces critères, cf. par exemple T. S. Kuhn, *The Essential Tension*, Chicago, The University of Chicago Press, 1977, trad. fra. M. Biezunski *et al*, *La Tension Essentielle*, Paris, Gallimard, 1990, p. 426-427.