

# Une critique de la position de Dirac concernant le choix entre des interprétations quantiques

Thomas Boyer-Kassem

Département de Philosophie, laboratoire MAPP

Université de Poitiers

à paraître dans F. Laguens (dir.), *La Philosophie des physiciens, XXe-XXIe siècles*,

Éditions Matériologiques

## 1] Introduction : Dirac, la mécanique quantique et ses interprétations

Paul Dirac, physicien britannique, contribua de façon décisive à l'élaboration de la mécanique quantique (cf. par exemple Darrigol 2009), ce qui lui valut le Prix Nobel de Physique en 1933. Il écrivit un manuel de mécanique quantique (Dirac 1930) qui devint une référence, régulièrement révisée et rééditée (Dirac 2009). Ses positions sur la mécanique quantique furent donc particulièrement écoutées dans la communauté physicienne et au-delà. Dans un article publié dans le journal de vulgarisation *Scientific American* (Dirac 1963)<sup>1</sup>, il se positionna notamment vis-à-vis du débat alors important, et qui continue de l'être aujourd'hui, concernant l'interprétation, ou plutôt les interprétations, de la mécanique quantique. En quelques mots (avant d'approfondir ceci dans la section 2), une interprétation de la mécanique quantique propose une image d'un monde dans laquelle la théorie est vraie, en spécifiant les types d'entités et de propriétés qui existent. Par exemple, elle dit si le monde est indéterministe, ou si les objets quantiques peuvent toujours se voir attribuer une position. Plusieurs interprétations quantiques étaient, et sont encore, sur le marché, en particulier les interprétations orthodoxe, bohémienne, et des mondes multiples. La première est l'héritière des travaux des fondateurs de la mécanique quantique et s'imposa dans les manuels universitaires, tandis que les deux dernières ont été proposées dans les années 1950.<sup>2</sup> Dans son article, Dirac défendait l'idée, qui semble partagée aujourd'hui encore par de nombreux scientifiques, que les questions d'interprétation ne sont pas des questions dont doivent se soucier les physiciens ou les physiciennes, mais les philosophes. Ainsi, pour choisir entre les différentes interprétations quantiques de la littérature, il convient d'employer des critères philosophiques et non scientifiques. Dans ce chapitre, je montre que, de fait, il n'en est rien : les protagonistes du débat, qu'ils soient scientifiques ou philosophes, utilisent essentiellement des critères de choix scientifiques et non pas philosophiques. J'utiliserai pour cela l'analyse de Kuhn des critères de

---

<sup>1</sup> Cet article correspond à la présentation donnée par Dirac le 2 octobre 1962 à la Conférence sur les Fondations de la Mécanique Quantique, au département de Physique de l'Université Xavier aux États-Unis. Cf. « The Evolution of the Physicist's Picture of Nature », *Scientific American*, 1963 May, Box: 5, Folder: 7. John B. Hart Conference on the Foundations of Quantum Mechanics Collection, XUA-90. University Archives and Special Collections, Xavier University Library. [https://archives.xavier.edu/repositories/2/archival\\_objects/2586](https://archives.xavier.edu/repositories/2/archival_objects/2586)

<sup>2</sup> Il existe des variations et des versions différentes selon les auteurs au sein de chacune de ces interprétations. Sur l'« invention » d'une interprétation orthodoxe dite de Copenhague, qui diffère par exemple de celle de Bohr, voir en particulier Howard (2004).

choix entre théories scientifiques, et procéderai à une reconstruction du débat portant sur le choix d'une interprétation quantique.

Je commence dans la section 2 par présenter en détail ce que sont les interprétations de la mécanique quantique, avant d'analyser dans la section 3 la position de Dirac. J'étudie ensuite dans la section 4 les critères de choix entre les interprétations. Cela me permet, dans la section 5, de revenir sur la position de Dirac, et de me positionner sur la nature scientifique ou philosophique de ce choix. La section 6 conclut.

## 2] La mécanique quantique et ses diverses interprétations<sup>3</sup>

### 2.1] Interpréter la mécanique quantique

Selon les mots de Feynman, Leighton & Sands (2021, p. 1), « la mécanique quantique est la description du comportement de la matière et de la lumière dans tous leurs détails et, en particulier, de tout ce qui se passe à l'échelle atomique ». Par exemple, la mécanique quantique a permis d'expliquer la nature de la lumière émise par le soleil et a rendu possible la réalisation de panneaux photovoltaïques à base de semi-conducteurs ou de l'imagerie par résonance magnétique utilisée à l'hôpital. La mécanique quantique est sans conteste une théorie couronnée de succès d'un point de vue empirique, tant d'un point de vue fondamental qu'appliqué. Deux aspects ne font pas débat dans les communautés physicienne et philosophique : d'une part, la façon d'utiliser ou d'appliquer la mécanique quantique (comment faire les calculs), et d'autre part l'accord entre les prédictions de la mécanique quantique et les observations expérimentales, qui est excellent. En ce sens, la mécanique quantique est une excellente théorie physique.

En revanche, un point fait débat depuis les débuts de la théorie il y a un siècle : la façon d'interpréter la mécanique quantique. L'interprétation d'une théorie est là pour donner l'image d'un monde dans laquelle la théorie est vraie, en précisant les types d'entités et de propriétés que comporte ce monde. Ce faisant, l'interprétation fournit ce que l'on appelle parfois aussi « un cadre conceptuel » ou une « ontologie », elle décrit « la réalité », « ce à quoi ressemble vraiment la Nature », ou donne « l'image derrière le formalisme ». Par exemple, ce n'est pas la théorie elle-même (ou son formalisme) mais son interprétation qui permet de dire si le monde est indéterministe, ou si un électron a une trajectoire définie même lorsqu'on ne la mesure pas.

Ce concept d'interprétation a, schématiquement, été analysé de deux façons par la tradition philosophique, à travers les conceptions syntaxique et sémantique des théories scientifiques.<sup>4</sup> Selon la conception syntaxique, issue de l'empirisme logique, une théorie scientifique est un ensemble d'énoncés – par exemple, des postulats et des équations. Ces énoncés comportent des termes de deux types : théoriques (par exemple : « électron » ou « force »), ou observationnels (par exemple « longueur » ou « le nombre affiché sur l'appareil »). L'interprétation, ou le sens, des termes observationnels est claire : elle est donnée directement par l'expérience et les objets observables. L'interprétation des termes théoriques, précisément, ne peut pas être donnée aussi directement. Elle se fait à travers des « règles de correspondance », c'est-à-dire des énoncés qui associent des termes théoriques et des termes observationnels, ce qui permet au sens empirique de remonter, pour ainsi dire, jusqu'aux termes théoriques. Par exemple, le terme théorique d'« électron » peut être interprété comme ce qui fait tel type de trace dans une chambre à brouillard (qui est un terme empirique, une chambre à brouillard étant un appareil de mesure du début du siècle passé). Dans la

---

<sup>3</sup> Cette section s'appuie notamment sur mon livre Boyer-Kassem (2015), auquel on pourra se référer pour davantage de détails. Conformément à une longue tradition de la littérature qui étudie les interprétations quantiques, je considère dans ce chapitre la mécanique quantique dans sa partie non-relativiste, c'est-à-dire hors théorie quantique des champs. Pour une présentation des enjeux interprétatifs ou philosophiques de la théorie quantique des champs, voir Kuhlmann (2023).

<sup>4</sup> Pour une présentation approfondie et une discussion critique des conceptions syntaxique et sémantique, voir par exemple Vorms (2011).

conception syntaxique des théories, l'interprétation de la théorie repose sur les règles de correspondance qui permettent aux termes théoriques d'avoir un référent. Ainsi, pour reprendre la définition proposée plus haut, l'image du monde dans laquelle la théorie est vraie est une interprétation dans la mesure où elle repose sur ces règles de correspondance.

La conception sémantique des théories scientifiques, développée dans la seconde moitié du vingtième siècle, ne retient pas la nature linguistique des théories. Elle considère plutôt qu'une théorie est une famille de modèles, au sens logico-mathématique suivant. Si on considère un énoncé mathématique ou formel, comme une équation, cet énoncé ne dit rien du monde tant qu'on ne dit pas comment les symboles doivent être compris. Au lieu de donner des règles explicites d'interprétation entre les symboles et le monde comme le faisaient les règles de correspondance, on peut directement identifier les situations ou les « mondes » dans lesquels l'énoncé formel est rendu vrai. Ainsi, interpréter une théorie revient à préciser les conditions sous lesquelles la théorie (dans l'exemple précédent : l'énoncé) est vraie, en indiquant les entités et leurs propriétés qui peuplent ce monde. La théorie n'est plus identifiée à sa formulation linguistique, mais à la classe des modèles qui rendent vrais les énoncés. La théorie peut recevoir des formulations différentes, sans perdre son identité.

Ces deux conceptions, syntaxique et sémantique, peuvent s'appliquer au cas de la mécanique quantique. L'interprétation quantique aura ainsi pour rôle de fournir l'image d'un monde dans lequel la théorie est vraie. Pour la conception syntaxique, les concepts théoriques de l'image du monde prendront sens grâce aux règles de correspondance, tandis que pour la conception sémantique, l'image est fournie par des modèles. Notons qu'interpréter la théorie ne revient pas nécessairement à être réaliste envers elle : il est possible de considérer que ces entités n'existent pas réellement, mais que dans un monde où elles existeraient, cela rendrait la théorie vraie (ce qui est le sens de l'interprétation au sens sémantique).

Les sections suivantes présentent trois interprétations quantiques importantes, qui fournissent autant d'images du monde radicalement différentes : l'interprétation orthodoxe, l'interprétation de Bohm et l'interprétation des mondes multiples.<sup>5</sup> Il en existe d'autres, comme l'interprétation relationnelle ou l'interprétation du bayésianisme quantique (Qbism), mais ces trois-là devraient au moins permettre de cerner les différences principales ainsi que les critères utilisés pour les défendre ou les attaquer.

Deux caractéristiques sont importantes dans cette multiplicité d'interprétations : la première est qu'elles sont empiriquement équivalentes, au sens où aucune expérience réalisable ne pourrait permettre de trancher entre ces interprétations. Elles sont vouées à être indistinguables d'un point de vue empirique.<sup>6</sup> En cela, nous ne considérons pas ici la théorie GRW (Ghirardi, Rimini & Weber 1986), qui conduit à des prédictions différentes dans certains cas. Deuxièmement, il n'existe pas, parmi les scientifiques ou les philosophes qui s'intéressent à la question de l'interprétation, de véritable consensus concernant la « bonne » interprétation, ou une interprétation qui serait nettement préférable aux autres, ce qui fait que le débat perdure. Cela n'empêche pas que, de fait, les physiciens et physiciennes qui ne se soucient pas des problèmes interprétatifs utilisent l'interprétation orthodoxe.

---

<sup>5</sup> Ces « interprétations » ne devraient-elles pas plutôt être considérées comme des « théories » différentes, au sens syntaxique ? Je considère cette objection plus bas dans la section 2.5, une fois les principales interprétations présentées, afin que la discussion puisse s'appuyer sur des éléments plus concrets.

<sup>6</sup> On pourrait objecter avec Laudan & Leplin (1991) que l'affirmation selon laquelle deux théories (ou ici, interprétations) sont empiriquement équivalentes est à la fois contextuelle et révisable. Toutefois, il faut remarquer que cette thèse est avancée comme une simple éventualité théorique. Dans le cas de la mécanique quantique, il existe des résultats qui établissent la solidité mathématique de l'équivalence, ce qui, de l'aveu même de Laudan et Leplin, permet d'échapper à leur argument. Par exemple, Albert (1992, p. 157-158) et Dürr & Teuffel (2009, p. 179-180) expliquent comment la fonction d'onde bohmienne subit une réduction effective même en l'absence de postulat de projection, ce qui conduit à des calculs mathématiques similaires. Toutefois, l'idée d'une stricte équivalence empirique est débattue par certains, voir par exemple Das, Nöth & Dürr (2019) ou Adlam (2021, p. 41).

## 2.2] L'interprétation orthodoxe

L'interprétation orthodoxe se trouve enseignée dans l'immense majorité des manuels universitaires de mécanique quantique.<sup>7</sup> Avec cette interprétation, la formulation naturelle de la théorie passe par l'attribution d'un état, ou fonction d'onde, au système physique étudié. Par exemple, on attribue l'état  $| \text{ici} \rangle$  à un électron qui se trouve « ici ». Les prédictions expérimentales sont, de façon générale, probabilistes : pour un électron dans l'état  $(| \text{ici} \rangle + | \text{là} \rangle)/\sqrt{2}$ , la probabilité est de 0,5 de le trouver « ici », et 0,5 de le trouver « là ».<sup>8</sup> Les règles d'évolution de l'état sont différentes selon si une mesure est ou non réalisée sur le système. S'il n'y a pas de mesure, l'état évolue selon une équation différentielle déterministe, l'équation de Schrödinger ; s'il y a une mesure, l'état devient celui correspondant au résultat de la mesure<sup>9</sup> – c'est le postulat de projection. Par exemple, si l'électron dans l'état  $(| \text{ici} \rangle + | \text{là} \rangle)/\sqrt{2}$  est mesuré « là », son nouvel état devient simplement  $| \text{là} \rangle$ . Selon l'interprétation orthodoxe, une mesure ne révèle pas l'état du système, mais le modifie de façon aléatoire. Les probabilités sont en effet interprétées de façon objective : elles ne traduisent pas une simple connaissance ou ignorance de la part des scientifiques, mais la nature fondamentalement indéterministe du monde quantique.

Ce qui existe selon l'interprétation orthodoxe sont les systèmes : les électrons, les atomes, etc. Ces systèmes ont une propriété si et seulement si le résultat de la mesure correspondante peut être prédit avec certitude, c'est-à-dire si la probabilité que prédit la mécanique quantique est de 1. Par conséquent, un système n'a pas toujours de propriété ! Par exemple, on ne peut pas attribuer de position à l'électron dans l'état  $(| \text{ici} \rangle + | \text{là} \rangle)/\sqrt{2}$ , puisque « ici » et « là » sont chacun prédits avec une probabilité de 0,5. Dans l'interprétation orthodoxe, le monde est toujours coupé en deux : une partie est quantique (comprenant le système étudié), le reste est classique (comprenant notamment l'appareil de mesure).

## 2.3] L'interprétation de Bohm

Dans l'interprétation de Bohm, l'équation de Schrödinger est complétée par des « variables cachées », en l'occurrence les positions des particules. C'est-à-dire que la théorie définit à chaque instant la position de chaque particule – contrairement à ce qui a cours dans l'interprétation orthodoxe. Toutes les autres grandeurs, qui se définissent à partir des positions des particules, sont également définies à chaque instant (par exemple, la mesure de l'énergie d'un système passe par la mesure de la position d'un curseur sur un appareil de mesure, ou la position de photons provenant d'un écran lumineux). Deux précisions ou nuances doivent toutefois être apportées : d'une part, bien que la théorie définisse ces positions, elle ne donne en général pas leur valeur. Il y a donc du sens à parler de la position d'une particule quelconque et les calculs peuvent employer la variable mathématique correspondante, mais sa valeur n'est pas connue, sauf cas particulier. D'autre part, et cela découle du point précédent, la définition de ces positions ne permet pas à la théorie de faire de prédictions empiriques plus précises. En particulier, les prédictions quantiques bohmiennes sont tout autant probabilistes que les prédictions orthodoxes. Cela est cohérent avec l'équivalence empirique qui existe entre les deux, mentionnée plus haut.

L'interprétation de ces probabilités change : elle devient subjective et épistémique, comme un reflet de notre ignorance de ces positions. Le monde bohmien est fondamentalement déterministe. Par ailleurs, la formulation de la théorie est modifiée par la suppression du postulat de projection, l'ajout d'une équation dite « pilote » qui régit l'évolution des positions des particules, et enfin l'ajout d'un postulat dit « de l'équilibre quantique » sur la distribution initiale des particules. Ce qui

<sup>7</sup> Comme mentionné plus haut, cette interprétation orthodoxe des manuels diffère de l'interprétation des pères fondateurs tels que Bohr.

<sup>8</sup> La division par  $\sqrt{2}$  dans l'expression mathématique de l'état provient du fait que la probabilité est donnée par un module carré, et  $(1/\sqrt{2})^2 = 0,5$ .

<sup>9</sup> Dans les cas simples, dits non-dégénérés. Dans le cas général, l'état juste après la mesure est l'état juste avant la mesure projeté sur le sous-espace propre correspondant au résultat de la mesure.

existe pour l'interprétation bohémienne sont les particules, et également la fonction d'onde. Le monde quantique bohémien n'est pas coupé en deux, il n'y a plus de nécessité de conserver une partie classique.

## 2.4] L'interprétation des mondes multiples

Par rapport à la formulation orthodoxe, l'interprétation des mondes multiples ne rajoute aucune équation. Elle supprime le postulat de projection pour ne conserver que l'équation de Schrödinger comme seule règle d'évolution. Lors d'une mesure, les états dits superposés, comme  $(| \text{ici} \rangle + | \text{là} \rangle)/\sqrt{2}$ , ne sont plus projetés sur une seule composante, «  $| \text{ici} \rangle$  » ou «  $| \text{là} \rangle$  », mais sont interprétés d'une façon tout à fait originale : chaque composante représente un monde, et l'état total s'interprète comme une superposition de mondes. Par exemple, lorsqu'on mesure la position de l'état  $(| \text{ici} \rangle + | \text{là} \rangle)/\sqrt{2}$ , les deux résultats « ici » et « là » sont obtenus, chacun dans un monde. Il y a donc deux mondes : l'un dans lequel la particule est « ici », l'autre dans lequel la particule est « là ». Au fil des interactions, le nombre de mondes peut croître vertigineusement ; on appelle « univers » l'ensemble de ces mondes.

Selon l'interprétation des mondes multiples, ce qui existe fondamentalement est la fonction d'onde de tout l'univers, et non pas directement les particules. Celles-ci, ou tout autre objet, n'a généralement pas de propriété dans l'univers ; en revanche, elles en ont dans un monde donné. Par exemple, l'électron de notre exemple n'a pas de position si on considère l'univers, mais dans un monde il est ici, tandis que dans l'autre il est là. Puisque tous les résultats de mesure sont toujours tous obtenus, il n'y a aucune place pour un quelconque hasard, et l'univers est déterministe. Les probabilités, quant à elles, sont interprétées objectivement, comme traduisant des paris que peut faire tout agent rationnel.

## 2.5] Des « interprétations » ou des « théories » ?

Ce que nous avons appelé jusqu'ici « interprétations » se trouve parfois appelé « théories » dans la littérature, comme dans les expressions « théorie de Bohm » ou « théorie des mondes multiples ». Ce qui semble aller dans ce sens est par exemple notre propre mention ci-dessus que chacune des interprétations propose, à travers ses équations mathématiques ou ses postulats, une formulation théorique qui lui est propre. Et si, comme le soutient la conception syntaxique des théories (cf. section 2.1), une théorie physique se définit par ses énoncés, alors il faudrait reconnaître que ces « interprétations » conduisent à des énoncés différents et donc à des « théories » bien distinctes. Dans la littérature, un auteur comme Acuña (2021), s'appuyant par exemple sur Ruetsche (2011), défend différemment cette même conclusion : la base théorique qui est commune à toutes les « interprétations » est trop mince pour permettre de déterminer les modèles à travers lesquels la théorie va concrètement s'appliquer ; aussi, il est nécessaire d'ajouter une interprétation qui définira une authentique théorie, pouvant s'appliquer empiriquement. Et différentes interprétations définiront donc en réalité différentes théories.

Ces positions semblent reposer sur une adhésion à la conception syntaxique des théories scientifiques. Acuña n'est par exemple pas explicite, mais il écrit que « l'image de la réalité physique »<sup>10</sup>, *i.e.* l'ontologie ou « l'interprétation » (au sens de ma définition dans la section 2.1), fait partie de ce qui définit une théorie. Autrement dit, dès le départ, il suppose que des ontologies différentes définiront des théories différentes. Il n'est donc pas étonnant qu'il conclue que les « interprétations » sont en réalité des « théories ». Or ce n'est pas le seul choix conceptuel possible. On peut, au contraire, considérer avec la conception sémantique des théories que non seulement des formulations mathématiques différentes ne définissent pas d'emblée des théories distinctes, mais aussi que des interprétations différentes, avec des ontologies différentes, pourront être proposées pour une même théorie (au sens d'énoncés formels non-interprétés).

---

<sup>10</sup> Acuña (2021, section 2.1). Je traduis à partir de l'article écrit en anglais, et de même pour les autres citations dont la référence est en langue anglaise.

Autrement dit, la question de savoir si les « interprétations » sont en fait des « théories » dépend au fond de notre conception de ce qu'est une « théorie », et les conceptions syntaxique et sémantique des théories scientifiques apportent des réponses opposées. Je fais ici le choix de suivre la conception sémantique, et par conséquent de conserver le terme d'« interprétations » d'une même théorie. Non pas que cette conception soit exempte de critiques (e.g. Boesch 2024), mais elle fut historiquement développée pour combler certaines limites de la conception syntaxique (cf. Suppe 1977), et semble plus à même de rendre compte de l'unité et de l'équivalence prédictive de ces différentes interprétations : la théorie formelle est rendue vraie par la même classe de modèles, et elle n'est pas liée à une formulation linguistique ou axiomatique particulière.<sup>11</sup> Par ailleurs, parler d'« interprétations » est globalement en accord avec l'usage de la littérature. Quoi qu'il en soit, et c'est le plus important, parler de « théories » n'amènerait pas grande différence dans la critique que je propose de faire de la position de Dirac.

### 3] La position de Dirac concernant l'interprétation de la mécanique quantique

Selon quels critères devrait-on évaluer ou choisir une interprétation quantique ? Dirac écrit :

« si nous pouvons trouver une façon de décrire les relations d'incertitudes et l'indétermination de la mécanique quantique actuelle qui satisfasse nos idées philosophiques, nous pouvons nous estimer heureux. » (Dirac 1963, p. 49)

Les relations d'incertitudes de la mécanique quantique sont des inéquations qui peuvent être interprétées comme traduisant une forme d'imprévisibilité ou d'inconnaissabilité du monde, en lien avec son indéterminisme (cf. Hilgevoord & Uffink 2024). L'indétermination dont parle Dirac est le caractère probabiliste des prédictions quantiques, qui provient d'un hasard fondamental selon l'interprétation orthodoxe. En parlant d'« une façon de décrire » certains aspects de la théorie, Dirac fait référence à ce qu'il appelle « l'image » qu'il s'agit de « mettre en place derrière le formalisme » (Dirac 1963, p. 48), c'est-à-dire l'interprétation de la théorie. Autrement dit, Dirac affirme que le critère pour évaluer une interprétation est *la cohérence avec nos idées philosophiques préalables*. On peut imaginer par exemple qu'il s'agit de conceptions métaphysiques, telles que : les objets doivent avoir des propriétés définies à chaque instant ; le monde ne peut être fondamentalement indéterministe. Dirac ne semble donc pas estimer que les questions interprétatives doivent se régler avec des critères scientifiques, ou peut-être même fassent partie de la science, mais doivent être résolues grâce à la philosophie.<sup>12</sup>

Dirac renouvelle cette position dans un autre passage :

« Comment peut-on former une image cohérente derrière les règles de la mécanique quantique actuelle ? Ces difficultés de Première Classe n'inquiètent pas vraiment le physicien. Si le physicien sait comment calculer des résultats et les comparer avec l'expérience, il est tout à fait heureux si les résultats s'accordent avec ses expériences, et c'est tout ce dont il a besoin. C'est seulement le philosophe, qui veut avoir une description satisfaisante de la Nature, qui est préoccupé par ces difficultés de Première Classe. » (Dirac 1963, p. 48).

---

<sup>11</sup> Voir Suppe (1989) p. 82 pour le cas de la mécanique classique et des formulations lagrangienne et hamiltonienne (cité par Vorms 2011 p. 155).

<sup>12</sup> Il convient de préciser que, selon Dirac, trouver une image (ou interprétation) qui convienne à la mécanique quantique n'est pas un problème très pressant car elle sera vraisemblablement transitoire, étant donné que la mécanique quantique elle-même devra connaître des développements et être remplacée par une autre théorie (en particulier capable de justifier la valeur de la constante de structure fine). Il ajoute ainsi que, si on ne peut pas trouver une image qui convienne, « il n'y a pas de quoi être véritablement troublé » (*ibid.* p. 49). Ainsi, la position exprimée par Dirac dans la citation ne concerne à strictement parler la mécanique quantique qu'en tant qu'elle est une théorie transitoire. Néanmoins, rien ne permet de penser qu'il défendrait une autre position pour une théorie définitive, donc je supposerai que sa position est générale.

Les « règles » dont il est question dans la première phrase sont les règles prédictives, c'est-à-dire la façon dont la mécanique quantique est appliquée et parvient à des prédictions au moyen de calculs. Dirac pose ainsi la question de l'image, ou l'interprétation, qui convient pour la mécanique quantique. La cohérence souhaitée peut se comprendre de deux façons : interne, au sens où l'interprétation ne doit pas se contredire elle-même (ce qui semble une condition minimale), et/ou externe, avec d'autres théories ou idées, et la citation précédente indiquait qu'elle devait se comprendre en rapport avec nos idées philosophiques. On retient ainsi que selon Dirac, élaborer ou choisir une interprétation quantique est un travail pour philosophe, et non pour physicien, et qu'il s'agit d'avoir un accord avec nos idées philosophiques préalables.

Cette thèse de Dirac a été, et est encore, populaire dans la communauté physicienne. De nombreux physiciens et physiciennes quantiques estiment qu'ils n'ont pas à se soucier de questions interprétatives, lesquelles concernent les philosophes seulement, selon des critères philosophiques et non scientifiques.<sup>13</sup> Dans la suite de ce chapitre, je souhaite montrer que cette conception n'est pas fidèle à la réalité du débat sur les interprétations de la mécanique quantique. Les critères que les protagonistes mobilisent sont essentiellement les critères habituels du choix théorique.

## 4] Reconstruction des critères de choix entre interprétations quantiques

Dans cette section, je propose une reconstruction des critères utilisés pour choisir entre les interprétations quantiques. Je commence par présenter l'analyse classique de Kuhn, avant de l'appliquer au débat quantique.

### 4.1] L'analyse de Kuhn

Thomas Kuhn (1990) offre une analyse des caractéristiques d'une bonne théorie scientifique, c'est-à-dire des critères (ou vertus théoriques) mobilisés par les scientifiques lorsqu'ils choisissent entre diverses théories concurrentes. Kuhn liste cinq telles caractéristiques :<sup>14</sup> la précision, c'est-à-dire l'accord entre prédictions et observations ; la cohérence, de façon à la fois interne de la théorie avec elle-même, et externe, avec d'autres théories ; l'envergure, qui doit aller au-delà des phénomènes initialement à expliquer ; la simplicité, qui revient à mettre de l'ordre dans le confus des phénomènes ; et la fécondité, qui est la capacité à susciter de nouvelles découvertes.

Kuhn note immédiatement deux difficultés qui se présentent lors de l'utilisation de ces critères. La première est que chacun des critères est imprécis, de sorte qu'il peut être légitime pour deux scientifiques de comprendre un critère différemment et d'être par conséquent en désaccord quant à son application. Une théorie peut par exemple être plus simple au sens où elle comporte moins d'équations, mais moins simple dans le nombre d'entités qu'elle postule. Deuxièmement, pris ensemble, les critères entrent facilement en conflit. Une théorie peut être plus précise tandis que sa concurrente aura plus d'envergure. Aussi, les scientifiques vont devoir prioriser ou pondérer les critères, ce qui peut être fait de différentes manières.

Il convient de remarquer que l'analyse kuhnienne est jusqu'ici descriptive et non pas normative : elle ne dit pas comment les scientifiques *devraient* choisir leurs théories, mais comment, de fait, ils choisissent ou ont choisi. Toutefois, la thèse normative n'est pas loin : Kuhn estime ensuite que, en raison des caractéristiques de ces critères (imprécision, pondérations différentes), il est légitime et

---

<sup>13</sup> Pour ne prendre que deux exemples, voir par exemple l'influent manuel de mécanique quantique de Messiah (1964), p. 48 (cité par Freire 2004 p. 1745), ou l'affirmation d'Adlam dans son manuel de philosophie de la mécanique quantique selon laquelle « ce n'est pas le travail des physiciens de choisir » (p. 41) entre des interprétations quantiques qui donnent les mêmes prédictions.

<sup>14</sup> Kuhn ne prétend pas que sa liste de critère soit particulièrement originale et se revendique en accord avec la tradition (sans citer toutefois de sources). En accord avec cette position, ma référence à ce chapitre de Kuhn est surtout faite pour des raisons de simplicité pratique.

rationnel pour des scientifiques de procéder à des choix théoriques différents en fonction de facteurs subjectifs. Les critères listés par Kuhn ne s'appliquent pas de façon mécanique comme une règle ou un algorithme, mais de façon souple, à la manière de valeurs qui influencent un choix sans le déterminer.

## 4.2] Application au débat interprétatif en mécanique quantique

Je propose désormais d'étudier si cette analyse de Kuhn est pertinente pour le choix entre les interprétations quantiques. Ma thèse est affirmative. Dans cette section, je montre que les mêmes critères (à l'exception bien entendu de celui de précision, puisque les interprétations sont empiriquement équivalentes) jouent un rôle de premier plan dans le débat sur les interprétations quantiques, et de façon imprécise comme l'indique Kuhn. Ainsi, c'est une reconstruction rationnelle du débat quantique grâce à la grille d'analyse kuhnienne que je propose.

Commençons par donner des exemples d'utilisation de chacun des critères kuhnien dans le débat quantique. Le critère de cohérence est omniprésent. Everett, dont les travaux ont servi de base à l'interprétation des mondes multiples,<sup>15</sup> considérait par exemple que l'interprétation orthodoxe était « logiquement incohérente » (Barrett 2023, § 2), car elle ne permettait pas de décrire correctement certaines mesures réalisées de façon imbriquées – A mesure B qui mesure C. Autrement dit, le reproche d'Everett portait sur la version interne du critère de cohérence. L'interprétation des mondes multiples est-elle plus cohérente ? Dans son ontologie, les mondes sont censés se définir selon la décomposition mathématique de la fonction d'onde de l'univers. Or il existe une infinité de façons de le faire. C'est le problème dit de la « base préférée » (cf. Vaidman 2021, § 6.2), que l'on peut voir comme un problème de cohérence interne (par exemple, Drezet 2016, p. 77 parle d'« auto-cohérence »). Ou encore, lorsqu'Esfeld et al. (2014, p. 782) discutent des ontologies envisageables pour l'interprétation de Bohm, ils évaluent si elles sont « cohérente[s] ».

Considérons maintenant le critère d'étendue. Wallace, défenseur de l'interprétation des mondes multiples, écrit que « n'importe quelle formulation de la mécanique quantique qui donne un rôle particulier à la mesure [comme le fait l'interprétation orthodoxe] aura de sérieuses difficultés avec la cosmologie quantique » (Wallace 2012, p. 27). En effet, l'interprétation orthodoxe suppose qu'une partie du monde soit traitée classiquement (typiquement, l'appareil de mesure), ce qui empêche que la théorie puisse être appliquée à l'ensemble de l'univers comme la cosmologie l'exige. Ainsi, le reproche envers l'interprétation orthodoxe est que son étendue est trop limitée.

Le critère de simplicité est régulièrement mobilisé lui aussi. Barrett écrit que l'interprétation d'Everett est « sans doute aussi simple qu'une formulation de la mécanique quantique peut l'être » (Barrett 2023, § 8), étant donné qu'elle ne contient qu'une seule règle d'évolution pour l'état, à savoir l'équation de Schrödinger (elle ne considère pas le postulat de projection).

Enfin, la fécondité de l'interprétation est également invoquée, par exemple par Everett, qui écrit dans son article séminal de 1957 : « Cet article [...] présente une reformulation de la théorie quantique dans une forme jugée appropriée pour être appliquée à la relativité générale » (Everett 1957, p. 454). Autrement dit, l'interprétation proposée dans l'article devrait permettre d'élaborer une nouvelle théorie qui unifierait quantique et relativité, ce qui montrerait sa fécondité. Bohm insiste également sur la fécondité de sa proposition en indiquant qu'elle pourrait permettre de résoudre certaines difficultés de la théorie quantique pour les très petites distances (Bohm 1952, p. 166-167).<sup>16</sup>

Kuhn ajoute que les critères de choix théorique sont imprécis et peuvent être légitimement compris de diverses manières. Cela se vérifie facilement dans le cas quantique, en considérant par exemple

---

<sup>15</sup> Sur la différence entre l'interprétation de l'état relatif d'Everett et l'interprétation des mondes multiples, cf. Barrett 2023, notamment §7.

<sup>16</sup> Ces deux exemples suggèrent que, si l'équivalence empirique de ces deux interprétations avec l'interprétation orthodoxe fait aujourd'hui partie d'une stratégie argumentative en leur faveur, cela n'a pas toujours été le cas. Voir aussi Freire 2004 (p. 1745).

le critère de simplicité. Il est implicitement considéré par Barrett comme s'appliquant aux *équations* : c'est parce que l'interprétation des mondes multiples ne s'appuie que sur la seule équation de Schrödinger qu'elle peut être considérée comme plus simple que l'interprétation orthodoxe, qui ajoute le postulat de projection valable lors d'une mesure. Mais les bohmiens, qui sont conscients de l'objection selon laquelle leurs équations supplémentaires, mettant en jeu un potentiel et des positions de particules, pourraient être accusées d'être moins simples, se défendent en montrant qu'elles « dérivent d'argument de minimalité, de simplicité et de symétrie » (Dürr & Teufel 2009, p. 146). S'ils accordent une grande importance au critère de simplicité concernant les équations, ils le comprennent différemment : la simplicité ne se rapporte pas au nombre d'équations, mais à leur forme ou leur structure mathématique. Encore différemment, le critère de simplicité peut être compris en rapport avec l'*ontologie* plutôt qu'avec les mathématiques.<sup>17</sup> L'interprétation de Bohm, qui attribue une position à chaque particule à chaque instant, qu'elle soit observable ou non, se voit accuser d'offrir un « surplus de contenu descriptif » (Bitbol 2002 p. 8) par rapport à l'interprétation orthodoxe, c'est-à-dire du contenu qui n'est pas directement testable empiriquement. Le même genre de considération s'applique à l'interprétation des mondes multiples : « Il semble que l'opposition à l'interprétation des mondes multiples provienne principalement de l'introduction d'un très grand nombre de mondes que nous ne voyons pas : cela ressemble à une violation extrême du principe d'Ockham : 'Les entités ne doivent pas être multipliées au-delà de la nécessité' » (Vaidman 2021, § 6.1). Une façon encore différente de comprendre le critère de simplicité est de l'appliquer aux *explications* fournies par l'interprétation, comme l'écrit Bell : « Cette idée [d'une onde guidant une particule en mécanique bohmiennne] me semble être si naturelle et si simple, résoudre le dilemme onde-particule d'une façon si claire et ordinaire, que le fait qu'elle soit généralement ignorée est un grand mystère pour moi » (Bell 1987, p. 191).

Ainsi, les protagonistes du débat quantique argumentent en mobilisant des critères communs : cohérence, étendue, simplicité, fécondité. Ces critères peuvent être compris ou appliqués de diverses façons, tandis que la satisfaction de tel ou tel critère sera mise en avant par les défenseurs d'une interprétation particulière.

## 5] Retour sur la position de Dirac

Les analyses précédentes s'opposent nettement à la vision de Dirac. Concernant les critères de choix, tout d'abord : contrairement à ce qu'avance Dirac, les critères mobilisés par les protagonistes (scientifiques ou philosophes) ne sont pas la cohérence avec des idées philosophiques préalables, mais bien les critères du choix théorique habituels. Autrement dit, ce n'est pas parce que des concurrents ne peuvent pas être départagés par le critère de précision (puisque les interprétations quantiques sont empiriquement indistinguables) que tous les autres critères kuhniens sont abandonnés du même coup et que prévalent les préférences philosophiques préalables. Par ailleurs, comme ces critères kuhniens peuvent être considérés comme des valeurs scientifiques, cela signifie que celles-ci continuent d'influencer les choix interprétatifs en mécanique quantique. Choisir une interprétation est donc un choix principalement scientifique et non philosophique, contrairement là aussi à la position de Dirac. Ce ne sont pas tant les positions réalistes ou anti-réalistes, ou pour ou contre le déterminisme, qui nourrissent le débat interprétatif en mécanique quantique.

Une possibilité serait que ce genre de positions philosophiques soit à l'origine des choix interprétatifs des protagonistes, mais pas de leurs arguments. Par exemple, une personne qui serait préalablement attachée à l'idée du déterminisme pour des raisons philosophiques, choisirait l'interprétation de Bohm, tout en argumentant ensuite en sa faveur sur la base des critères kuhniens, et non de son attachement au déterminisme. Une telle possibilité est réelle, même si elle reste difficile à établir empiriquement. Quoi qu'il en soit, l'essentiel de l'*argumentation* que l'on peut

---

<sup>17</sup> Cette application peut être critiquée, comme noté par Belot (2012, p. 81).

trouver dans les livres et les articles ne porte pas sur des motifs de cohérence philosophique avec des opinions préalables, mais bien sur les critères (scientifiques) kuhnien.

On pourrait objecter le fameux « Dieu ne joue pas aux dés » d'Einstein, qui traduit le rejet de l'idée d'un monde indéterministe telle que la présentait la mécanique quantique orthodoxe, qu'il considérait comme incomplète. Cette citation n'exprime-t-elle pas un critère de choix qui s'appuie sur une conviction métaphysique préalable ? Ce serait oublier qu'Einstein ne discutait pas du choix à faire entre plusieurs interprétations quantiques, mais voulait convaincre que la théorie de la mécanique quantique existante devait être révisée et complétée. Sa conviction philosophique contre l'indéterminisme, si elle a joué un rôle, fonctionnait comme une idée régulatrice motivant la recherche d'une autre théorie, et non l'adoption d'une interprétation d'une théorie donnée.

Concernant la question de savoir si le choix d'une interprétation est un travail philosophique ou scientifique, on peut avancer un autre argument en faveur de l'aspect scientifique, reposant sur le fait qu'une interprétation (ou du moins certains éléments interprétatifs) est nécessaire pour appliquer la théorie. En effet, pour que la théorie de la mécanique quantique fasse des prédictions, il faut que soit précisé *ce qui est l'objet des prédictions*. Or les interprétations quantiques apportent des réponses divergentes : selon l'interprétation orthodoxe, il s'agit de n'importe quel résultat de mesure d'une grandeur observable (par exemple l'impulsion ou l'énergie) ; pour la mécanique bohémienne, il s'agit *in fine* nécessairement de la position de particules (par exemple, l'impulsion d'un électron en sortie de trous d'Young est mesurée indirectement grâce à la position de son impact sur l'écran) ; pour l'interprétation des mondes multiples, les prédictions de la théorie (et le sens qu'il y a à parler de probabilités) portent sur les paris des agents. Donc, à strictement parler, utiliser la théorie pour faire des prédictions suppose de faire un choix interprétatif, même minimal. Il n'existe pas de position rigoureusement interprétativement neutre, et l'idée selon laquelle la mécanique quantique n'a pas besoin d'interprétation pour être utilisée, comme le suggère Dirac (cf. § 3), est erronée.<sup>18</sup> « Si le physicien sait comment calculer des résultats et les comparer avec l'expérience » (Dirac 1963 p. 48), c'est qu'il a déjà choisi une interprétation, ou du moins écarté certaines interprétations possibles. Aussi, choisir une interprétation ne peut pas être un travail seulement pour le philosophe, et le physicien ferait bien de s'y pencher.

J'ai avancé l'idée que le choix interprétatif fonctionne de la même façon que le choix théorique, en l'occurrence avec les mêmes critères (sauf celui de précision). Pourquoi en est-il ainsi ? Deux explications peuvent être envisagées. La première, que je récuserai, est que ce qui a été appelé ici des « interprétations » quantiques sont en réalité des théories différentes ; par conséquent, il est bien normal que le choix entre elles se fasse selon les critères du choix théorique kuhnien, et la section précédente montre seulement que l'analyse de Kuhn s'applique aussi au choix entre les diverses théories quantiques (au-delà des exemples déjà considérés par Kuhn lui-même). Une telle explication ne me semble pas vraiment convaincante. Premièrement, il existe de bonnes raisons de considérer qu'il s'agit bien d'interprétations et non de théories, comme expliqué dans la section 2.5. Aussi, l'application des critères propres aux « théories » ne va pas de soi. Deuxièmement, même s'il s'agissait bien de théories, un intérêt de la section précédente demeure d'avoir établi que l'analyse de Kuhn s'applique aussi au choix entre des théories empiriquement équivalentes (alors qu'il l'a avancée sur des exemples de théories empiriquement distinctes). Autrement dit, la section précédente montre que, lorsque le critère empirique est satisfait exactement de la même façon pour deux « théories », les protagonistes continuent d'employer les autres critères kuhnien. Quoi qu'il en soit, peu importe que les « interprétations quantiques » soient ou non des « théories », cela donnerait tort à Dirac de la même façon : les critères utilisés pour choisir entre elles ne sont pas la cohérence avec des idées philosophiques.

Considérons maintenant une seconde explication, plus intéressante : le choix interprétatif fonctionne de la même façon que le choix théorique parce que l'interprétation fait partie de la théorie au sens large, c'est-à-dire que lorsqu'on choisit entre deux théories qui ne sont pas empiriquement

<sup>18</sup> Il n'est bien entendu pas le seul. Fuchs et Peres (2000) ont même écrit un article intitulé « La théorie quantique n'a besoin d'aucune 'interprétation' ».

équivalentes, l'évaluation porte déjà aussi sur l'interprétation de chacune des théories. Et lorsqu'on a à choisir entre de simples interprétations d'une même théorie, les critères théoriques peuvent continuer à s'appliquer, car ils ont du sens sur la partie interprétative et s'y appliquaient déjà. Par exemple, lorsqu'on évalue la simplicité d'une théorie, on peut considérer la difficulté des calculs qu'elle amène, tout comme le nombre d'entités qu'elle postule, une caractéristique qui se rapporte à l'interprétation de la théorie. Ou un argument en faveur de la théorie de Copernic face à celle de Ptolémée est qu'elle explique plus simplement la relation entre l'ordre et la vitesse des planètes, *en supposant que le Soleil est au repos absolu*, qui est une hypothèse relevant de l'interprétation (elle dit ce qui existe et ses propriétés). Ainsi, les critères du choix théoriques sont déjà en partie des critères du choix interprétatif.

## 6] Conclusion

Dirac considérait les questions interprétatives en mécanique quantique comme un problème pour philosophe et non pour physicien, et estimait que l'interprétation quantique devait être choisie pour son accord avec nos idées philosophiques préalables. J'ai montré au contraire que les protagonistes du débat, qu'ils soient philosophes ou physiciens, argumentent à propos des interprétations quantiques en s'appuyant sur les critères traditionnels kuhniens du choix théorique (cohérence, étendue, simplicité, fécondité). Choisir une interprétation est ainsi un travail davantage scientifique que ce que l'on pourrait penser. J'ai établi ces thèses en reconstruisant le débat, de façon descriptive. Ma conjecture est qu'elles valent aussi normativement, au sens où les physiciens et philosophes cités ont déjà la bonne approche, car je ne vois pas vraiment d'argument qui puisse faire abandonner les critères kuhniens dans le choix d'une interprétation.

## Remerciements

Je remercie Anouk Barberousse, Yanis Pianko et Vincent Ardourel pour des remarques formulées sur ce travail à différents stades de son avancement, ainsi que les audiences du IIIe congrès de la Société de Philosophie des Sciences (Paris, 2009) et du *Quantum Interdisciplinary Sciences Seminar* à l'Institut Néel (Grenoble, 2017).

## Bibliographie

- Acuña P. (2021), « Charting the landscape of interpretation, theory rivalry, and underdetermination in quantum mechanics », *Synthese* 198, p. 1711-1740.
- Adlam E. (2021), *Foundations of Quantum Mechanics*, Cambridge University Press.
- Barrett J. A. (2023), « Everettian Quantum Mechanics », *The Stanford Encyclopedia of Philosophy* (édition été 2023), E. N. Zalta & U. Nodelman (éds.), URL = <<https://plato.stanford.edu/archives/sum2023/entries/qm-everett/>>.
- Bell J. S. (1987), *Speakable and Unsayable in Quantum Mechanics*, Cambridge University Press.
- Belot G. (2012), « Quantum states for primitive ontologists. A case study », *European Journal for Philosophy of Science* 2, p. 67-83.
- Bitbol M. (2002), « Bohm et ses principes ampliatifs de sélection théorique », Académie des Sciences Morales et Politiques, URL = <<https://academiesciencesmoralesetpolitiques.fr/wp-content/uploads/2019/01/4-bitbol.pdf>>
- Boesch B. (2024), « Scientific Representation », *The Internet Encyclopedia of Philosophy*, ISSN 2161-0002, <https://iep.utm.edu/>, 17 mai 2024.

- Bohm D. (1952), « A Suggested Interpretation of Quantum Theory in terms of “Hidden” Variables », *Physical Review* 85, p. 166-193.
- Boyer-Kassem T. (2015), *Qu'est-ce que la Mécanique Quantique ?*, Vrin.
- Darrigol O. (2009), « A simplified genesis of quantum mechanics », *Studies in History and Philosophy of Modern Physics* 40, p. 151-166.
- Das S., Nöth M. & Dürr D. (2019), « Exotic Bohmian arrival times of spin-1/2 particles: An analytical treatment », *Phys. Rev. A* 99, 052124.
- Dirac P. A. M. (1930), *The Principles of Quantum Mechanics*, Oxford University Press.
- Dirac P. A. M. (1963), « The Evolution of the Physicist's Picture of Nature », *Scientific American* 208 (5), p. 45-53.
- Dirac P. A. M. (2009), *Les Principes de la mécanique quantique*, trad. fr. de la 4<sup>e</sup> édition de 1967 de Dirac (1930), S. Bréard, V. Faye, C. Poignon, Presses polytechniques et universitaires romandes.
- Dorato M. & Esfeld M. (2009), « GRW as an Ontology of Dispositions », *Studies in History and Philosophy of Modern Physics* 41, p. 41-49.
- Drezet A. (2016), « Analysis of Everett's quantum interpretation from the point of view of a Bohmian », *International Journal of Quantum Foundations* 2 (2016), p. 67-88.
- Dürr D. & Teufel S. (2009), *Bohmian Mechanics*, Springer.
- Esfeld M., Lazarovici D., Hubert M. & Dürr D. (2014), « The Ontology of Bohmian Mechanics », *The British Journal for the Philosophy of Science* 65 (4), p. 773-796.
- Everett H. (1957), « ‘Relative State’ Formulation of Quantum Mechanics », *Reviews of Modern Physics* 29, p. 454-462.
- Feynman R., Leighton R. B. & Sands M. (2021), *Le cours de Physique de Feynman. Mécanique Quantique* [1965], Dunod, trad. fr. B. Équer & P. Fleury.
- Freire O. Jr. (2004), « The Historical Roots of “Foundations of Quantum Physics” as a Field of Research (1950–1970) », *Foundations of Physics* 34 (11), p. 1741-1760.
- Fuchs C. & Peres A. (2000), « Quantum Theory Needs No ‘Interpretation’ », *Physics Today* 53 (3), p. 70-71.
- Ghirardi G.-C., Rimini A. & Weber T. (1986), « Unified dynamics for microscopic and macroscopic systems », *Physical Review D* 34 (2), p. 470-491.
- Hilgevoord J. & Uffink J. (2024), « The Uncertainty Principle », *The Stanford Encyclopedia of Philosophy* (édition printemps 2024), E. N. Zalta & U. Nodelman (eds.), URL = <<https://plato.stanford.edu/archives/spr2024/entries/qt-uncertainty/>>.
- Howard D. (2004), « Who Invented the ‘Copenhagen Interpretation’? A Study in Mythology », *Philosophy of Science* 71, p. 669-682.
- Kuhlmann M., « Quantum Field Theory », *The Stanford Encyclopedia of Philosophy* (édition été 2023), E. N. Zalta & U. Nodelman (eds.), URL = <<https://plato.stanford.edu/archives/sum2023/entries/quantum-field-theory/>>.
- Kuhn T. S. (1990), « Objectivité, jugement de valeur, et choix d'une théorie », in *La Tension Essentielle. Tradition et changement dans les sciences* [1977], Gallimard, trad. fr. M. Biezunski, P. Jacob, A. Lyotard-May, p. 424-449.
- Laudan L. & Leplin J. (1991), « Empirical Equivalence and Underdetermination », *The Journal of Philosophy* 88 (9), p. 449-472.
- Rovelli C. (1996), « Relational Quantum Mechanics », *International Journal of Theoretical Physics* 35, p. 1637-1678.

Ruetsche L. (2011), *Interpreting Quantum Theories*, Oxford University Press.

Suppe F. (1977), « Introduction – The Search for Philosophical Understanding of Scientific Theories », in F. Suppe (éd.), *The Structure of Scientific Theories* [1974], University of Illinois Press, seconde édition 1977, p. 1-241.

Suppe F. (1989). *The semantic view of theories and scientific realism*, University of Illinois Press.

Vaidman L. (2021), « Many-Worlds Interpretation of Quantum Mechanics », *The Stanford Encyclopedia of Philosophy* (édition automne 2021), E. N. Zalta (éd.), URL = <<https://plato.stanford.edu/archives/fall2021/entries/qm-manyworlds/>>.

Vorms M. (2011), *Qu'est-ce qu'une théorie scientifique ?*, Vuibert.

Wallace D. (2012), *The Emergent Multiverse*, Oxford University Press.