



HAL
open science

Interpréter une théorie physique

Thomas Boyer, Anouk Barberousse

► **To cite this version:**

Thomas Boyer, Anouk Barberousse. Interpréter une théorie physique. *Methodos: savoirs et textes*, 2013, 13, pp.XX. 10.4000/methodos.3118 . halshs-01053684

HAL Id: halshs-01053684

<https://shs.hal.science/halshs-01053684v1>

Submitted on 1 Aug 2014

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

Thomas Boyer et Anouk Barberousse

Interpréter une théorie physique

Avertissement

Le contenu de ce site relève de la législation française sur la propriété intellectuelle et est la propriété exclusive de l'éditeur.

Les œuvres figurant sur ce site peuvent être consultées et reproduites sur un support papier ou numérique sous réserve qu'elles soient strictement réservées à un usage soit personnel, soit scientifique ou pédagogique excluant toute exploitation commerciale. La reproduction devra obligatoirement mentionner l'éditeur, le nom de la revue, l'auteur et la référence du document.

Toute autre reproduction est interdite sauf accord préalable de l'éditeur, en dehors des cas prévus par la législation en vigueur en France.

revues.org

Revues.org est un portail de revues en sciences humaines et sociales développé par le Cléo, Centre pour l'édition électronique ouverte (CNRS, EHESS, UP, UAPV).

Référence électronique

Thomas Boyer et Anouk Barberousse, « Interpréter une théorie physique », *Methodos* [En ligne], 13 | 2013, mis en ligne le 11 mars 2013, consulté le 23 avril 2013. URL : <http://methodos.revues.org/3118> ; DOI : 10.4000/methodos.3118

Éditeur : Savoirs textes langage (UMR 8163)
<http://methodos.revues.org>
<http://www.revues.org>

Document accessible en ligne sur :
<http://methodos.revues.org/3118>
Document généré automatiquement le 23 avril 2013.
Tous droits réservés

Thomas Boyer et Anouk Barberousse

Interpréter une théorie physique

Introduction

- 1 Les théories sont généralement considérées comme les principales productions de l'activité scientifique. La théorie de l'évolution en biologie, la théorie de la relativité en physique ou la théorie des orbitales moléculaires en chimie en sont autant d'exemples. Enseignées à l'université, elles sont utilisées pour décrire, prédire et contrôler certains phénomènes.
- 2 En physique, domaine auquel cet article se limite, les théories sont très mathématisées, et ce depuis la fin du XVIII^e siècle. Cela signifie que ce que les scientifiques manipulent pour décrire, prédire et contrôler les phénomènes, ce sont (entre autres) des équations, comportant de nombreux symboles mathématiques. Par exemple, pour décrire, prédire et contrôler les phénomènes atomiques (qui sont au principe du fonctionnement d'une machine médicale d'IRM), la théorie de la mécanique quantique fait usage de vecteurs et d'opérateurs mathématiques, définis dans des espaces complexes dont le nombre de dimensions est parfois infini. Ces objets mathématiques, instruments indispensables de la physique depuis quatre siècles, n'ont pas de signification physique en eux-mêmes : ils ne « parlent » pas d'eux-mêmes des phénomènes. Une interprétation est nécessaire.
- 3 Ce qui nous intéresse dans cet article est ainsi l'interprétation dont une théorie physique doit faire l'objet pour remplir son rôle. En quoi consiste-t-elle pour le physicien au travail ? Considérons un physicien qui manipule les symboles mathématiques d'une théorie, en vue d'en tirer des prédictions expérimentales. Par exemple, il applique la théorie de la mécanique quantique à une partie de la machine d'IRM. Quelle place joue, dans son travail, l'interprétation des symboles mathématiques qu'il manipule ?
- 4 Selon une première option, le physicien théoricien manipule les symboles en quelque sorte « à l'aveugle », en suivant les règles des mathématiques, sans chercher à s'appuyer sur leur sens physique. C'est seulement à la fin de ces manipulations que la correspondance est établie, de façon quasi automatique, entre les symboles mathématiques et les résultats des expériences. Selon cette option, l'interprétation est un simple instrument permettant d'assigner aux symboles de la théorie un sens physique strictement limité aux résultats des expériences. Dans la suite de l'article, nous parlerons d'interprétation « pauvre » pour désigner cette conception de l'interprétation d'une théorie physique.
- 5 La conception de l'interprétation d'une théorie qui vient d'être brièvement présentée est sujette à controverse. En effet, si elle était correcte, on ne pourrait pas expliquer pourquoi la mécanique quantique, une théorie physique particulièrement importante en raison de l'étendue et de l'impressionnante précision de ses prédictions, admet aujourd'hui plusieurs interprétations, qui sont empiriquement équivalentes, c'est-à-dire que les expériences actuellement possibles ne permettent pas de décider quelle interprétation est la bonne, ou la meilleure. Le cas de la mécanique quantique montre, au moins à première vue, qu'interpréter une théorie ne consiste pas seulement à faire correspondre les symboles mathématiques aux résultats des expériences.
- 6 On peut songer à une seconde option pour analyser la place de l'interprétation dans le travail du théoricien : selon cette option, l'interprétation répond au désir de comprendre les phénomènes étudiés, en se formant une image cohérente de la nature. Elle va donc bien au-delà d'une simple correspondance réglée entre les symboles et les résultats d'expériences : cette correspondance est supposée acquise. Ici, interpréter une théorie consiste à composer une image du monde qui soit compatible avec la façon dont elle décrit mathématiquement les résultats des expériences. Nous parlerons d'interprétation « riche » pour désigner cette conception de l'interprétation d'une théorie physique.
- 7 Notre but dans cet article est de montrer que la distinction que nous venons de présenter entre deux rôles pour la démarche interprétative en physique doit être amendée. Nous nous appuyons sur l'exemple de la mécanique quantique, mais la distinction se veut valable en général pour toute théorie physique. Dans un premier temps, nous présentons de façon succincte quelques-

unes des interprétations actuelles de la mécanique quantique, afin de montrer par l'exemple en quoi elles consistent. Ensuite, nous approfondissons la distinction présentée ci-dessus et donnons des arguments en faveur de l'introduction d'une notion d'interprétation minimale dans la discussion.

Les interprétations de la mécanique quantique

8 Dans cette section, nous présentons trois interprétations contemporaines de la mécanique quantique, parmi les plus importantes. Notre objectif est de mettre en avant certaines différences majeures entre les diverses interprétations quantiques. C'est pourquoi nous nous en tenons aux grandes lignes, sans entrer dans le détail des multiples versions, variations et raffinements dont chacune fait l'objet. Comme cela se comprend de soi, il s'agit d'interprétations au second sens indiqué dans l'introduction.

L'interprétation orthodoxe des manuels

9 L'interprétation la plus connue parmi les physiciens est celle qui est enseignée à l'université (dans l'immense majorité des cas) et qu'on trouve au moins implicitement dans la plupart des manuels¹. On l'appelle généralement « interprétation orthodoxe », car elle incarne une tradition interprétative qui s'est présentée à l'origine comme la façon correcte d'interpréter la théorie. Elle est historiquement issue de l'interprétation dite « de Copenhague », en référence à la ville où a travaillé Niels Bohr, l'un des fondateurs de la mécanique quantique dans les années 1920.

10 Dans l'interprétation orthodoxe des manuels, on commence par définir le système étudié : un électron, une molécule par exemple. On associe à ce système un état, qui est représenté mathématiquement par une grandeur notée $\psi(t)$ et appelée « fonction d'onde ». Cet état est ce qui permet au physicien de répondre à toutes les questions expérimentales qui se posent à propos de ce système, au moyen de calculs gouvernés par les équations de la théorie. Par exemple, il permet de donner la probabilité que le système soit mesuré à telle position, ou avec telle vitesse. On dit parfois que l'état « contient toutes les informations qu'il est possible d'obtenir sur le corpuscule »². Mathématiquement, l'état est un vecteur d'un espace complexe multidimensionnel. La conséquence importante de cela est qu'une combinaison linéaire de plusieurs états est encore un état : par exemple, on peut additionner l'état d'être « ici » et l'état d'être « là » dans un état dit superposé entre « ici » et « là » ; la prédiction associée est que la probabilité que l'on trouve le système dans l'un de ces deux endroits est égale à 1/2.

11 Une caractéristique majeure de la mécanique quantique, qui est indépendante des interprétations, est que les prédictions théoriques qu'elle fournit sont probabilistes. Dans le cas général, elle ne prédit pas la position exacte (par exemple) qu'aura le système au temps t , mais seulement la probabilité qu'il ait cette position, et cette prédiction est vérifiée de façon statistique, en répétant l'expérience un grand nombre de fois. Comment cette probabilité doit-elle être comprise ?

12 Pour répondre à cette question, il faut s'engager sur la voie de la seconde option présentée dans l'introduction, celle selon laquelle l'interprétation d'une théorie lui associe une certaine image du monde. Dans ce cadre, on peut se demander si la probabilité qui affecte les prédictions de la mécanique quantique est objective, ce qui signifierait qu'un hasard fondamental est à l'œuvre dans la nature, ou s'il s'agit plutôt d'une probabilité épistémique, déterminée par les limites de notre pouvoir de connaître une nature intrinsèquement déterministe. À cette question, les diverses interprétations quantiques apportent des réponses divergentes. L'interprétation orthodoxe de la mécanique muantique soutient que ces probabilités sont à interpréter objectivement : selon elle, le monde est indéterministe, et les interactions quantiques sont le lieu de processus purement aléatoires³.

13 Dans l'image du monde couramment associée à l'interprétation orthodoxe, la fonction d'onde $\psi(t)$ est seulement un outil mathématique, qui n'a pas pour fonction de décrire quelque entité ou combinaison de propriétés que ce soit. Selon l'interprétation orthodoxe, le monde est constitué des systèmes quantiques eux-mêmes (électrons, molécules, etc.). Ces systèmes peuvent porter des propriétés à certains instants, comme par exemple « être à la position x » ou « avoir l'impulsion p » ; mais ces propriétés ne sont pas définies à chaque instant. Alors qu'un système

classique⁴ a toujours une position, le plus souvent, un système quantique n'en a pas. On le voit dans l'exemple indiqué plus haut : lorsqu'un système est dans une superposition d'états entre « ici » et « là », on ne peut pas dire qu'il a une position déterminée. C'est seulement lorsque son état est seulement « ici » (ou seulement « là ») qu'on peut légitimement lui attribuer une position.

- 14 Terminons cette brève présentation de l'interprétation orthodoxe en soulignant qu'elle a pour conséquence que les prédictions de la mécanique quantique portent exclusivement sur des résultats de mesure. Nous verrons par la suite que d'autres interprétations considèrent ces prédictions de façon entièrement différente.

L'interprétation des mondes multiples d'Everett

- 15 Selon l'interprétation dite « des mondes multiples », à la suite de la proposition formulée par Everett en 1957⁵, la fonction d'onde $\psi(t)$ a une fonction descriptive : elle renvoie à une entité physique, qui est d'ailleurs l'entité fondamentale de l'univers. Les systèmes quantiques (électrons, atomes...) et tous les objets macroscopiques (tables, ordinateurs...) émergent à partir de cette entité première, selon les lois fournies par la théorie.
- 16 La particularité la plus remarquable de l'interprétation quantique d'Everett est qu'elle fait l'hypothèse selon laquelle il existe non pas un seul monde, mais simultanément un très grand nombre de mondes, chacun d'apparence classique. Chaque monde est quasi-indépendant des autres, et inaccessible depuis un autre monde (d'où le fait qu'on a toujours l'impression de vivre dans un seul monde). Chaque interaction quantique est l'occasion d'un embranchement qui produit de nouveaux mondes. Par exemple, si on lance une pièce quantique à pile ou face⁶, on n'obtient pas un seul résultat : les deux résultats « pile » et « face » se produisent simultanément, chacun dans un monde différent (et nouveau) !
- 17 Puisque tous les résultats possibles des expériences (par exemple, le lancer d'une pièce) se produisent toujours simultanément, dans des mondes différents, il n'y a pas de sens à se demander lequel on va obtenir dans une expérience donnée. Le résultat mesuré est relatif au monde dans lequel il est mesuré ; il n'a pas plus de valeur que les autres résultats, qui sont obtenus dans d'autres mondes. Au point de vue de l'ensemble des mondes, il n'y a donc pas de hasard ; l'évolution d'ensemble des mondes est déterministe. Dans ce contexte, quelle est l'origine des probabilités que la théorie attribue aux prédictions ? La réponse est que c'est seulement parce que je me trouve en ce moment dans un monde particulier que j'ai une impression de hasard. L'interprétation des mondes multiples considère que les probabilités des prédictions de la théorie doivent être comprises comme attribuées par un agent rationnel qui parie sur les différents résultats possibles d'un processus. Dire que la probabilité d'obtenir « face » est d' $1/2$, cela veut dire qu'un agent rationnel est prêt à miser 50 euros, dans un jeu où il obtient 100 euros si la pièce tombe sur « face », et 0 sinon (plus exactement : 100 euros dans le monde où la pièce tombe sur « face » ; et 0 dans le monde où la pièce tombe sur « pile »). Bien que les probabilités soient ici associées à des agents, leur interprétation est objective (et non subjective) dans la mesure où elles sont déterminées par des contraintes de rationalité qui sont elles-mêmes objectives.
- 18 Sur quoi portent les prédictions de la mécanique quantique dans l'interprétation des mondes multiples ? Puisque tous les résultats possibles d'une expérience sont toujours réalisés, les prédictions ne peuvent porter sur la réalisation de tel résultat plutôt que tel autre. Au sens strict, dans l'interprétation d'Everett, les prédictions de la mécanique quantique portent sur les paris que des agents rationnels sont amenés à faire. C'est seulement par abus de langage qu'on peut dire que la mécanique quantique, interprétée selon Everett, prédit une chance sur deux pour « pile » (puisque selon cette interprétation, « pile » ne se réalise pas une fois sur deux, mais à chaque lancer).

L'interprétation de Bohm

- 19 La troisième interprétation de la mécanique quantique que nous souhaitons présenter a été proposée par David Bohm en 1952, redécouvrant indépendamment des résultats de Louis de Broglie des années 1920⁷. Cette interprétation de Bohm, ou « mécanique de Bohm »,

est parfois considérée non comme une simple interprétation de la théorie de la mécanique quantique, mais plutôt comme une autre théorie, car elle est appuyée sur une formulation mathématique différente de celle de la mécanique quantique orthodoxe. Au-delà de la question de la terminologie à employer, nous la considérerons ici comme une interprétation quantique parce qu'elle demeure empiriquement équivalente à la mécanique quantique orthodoxe ou everettienne, pour des raisons qui apparaîtront dans la section 2.

- 20 Alors que l'interprétation orthodoxe affirme que la fonction d'onde d'un système donne toutes les informations sur l'état de ce système, l'interprétation bohémienne estime que la fonction d'onde n'épuise pas ce qui peut être dit du système. Selon elle, un système (ou une particule) est aussi caractérisé à chaque instant par une position déterminée – en opposition avec l'interprétation orthodoxe, selon laquelle attribuer une position à chaque instant à un système n'a pas toujours de sens. Cela signifierait-il que, dans l'interprétation de Bohm, on peut toujours prédire avec certitude la position des particules (et donc, obtenir des prédictions plus précises que la mécanique quantique orthodoxe) ? Non, car si l'interprétation de Bohm attribue une position à chaque particule, elle ne dit pas quelle est sa valeur. Plus exactement, elle ne donne qu'une distribution statistique pour cette position, distribution qui correspond exactement aux probabilités de la mécanique quantique interprétée de façon orthodoxe. Ainsi, dans la mécanique de Bohm, les probabilités reflètent non pas un hasard fondamental, mais plutôt une ignorance de notre part : l'interprétation de ces probabilités est épistémique. Le monde quantique selon Bohm est déterministe : dans une expérience de lancer de pièce quantique, la face qui va sortir est déterminée avant le lancer, mais la théorie ne permet pas de dire laquelle.
- 21 Selon l'interprétation de Bohm, il existe deux types d'entités dans le monde : d'une part ce à quoi renvoie la fonction d'onde, qui est considérée comme une entité physique, et d'autre part les particules, qui ont toujours une position déterminée. Dans la mécanique bohémienne, ce qui fait l'objet des prédictions est toujours, en dernière analyse, la position de particules, et toutes les mesures se ramènent à des mesures de positions.

Que tirer de la diversité des interprétations de la mécanique quantique ?

- 22 Ce que montre la brève et partielle présentation des interprétations de la mécanique quantique que nous venons de faire, c'est que pour certains physiciens au moins, l'interprétation de la mécanique quantique est bien une affaire de construction d'une image du monde. Pour eux, il ne s'agit pas seulement d'établir une correspondance entre les prédictions de la théorie et les résultats des expériences, mais bien de comprendre, à partir d'hypothèses sur la signification des symboles de la théorie, ce qui explique ces résultats. Un élément majeur du débat entre interprétations est en effet de savoir ce sur quoi exactement portent les prédictions : même cette question suscite des réponses variées, alors qu'on pourrait s'attendre à ce qu'elle appelle une réponse unique.
- 23 La situation de la mécanique quantique est sans doute extrême : il s'agit d'une théorie suscitant de nombreuses interprétations qui ont toutes les mêmes prédictions empiriques, même si elles associent à ces prédictions des hypothèses fort différentes. Si les prédictions différaient, on parlerait sans hésitation de théories différentes ; mais la situation présente impose de réfléchir à la notion d'interprétation et à la pratique interprétative. C'est pourquoi nous nous penchons dans la section suivante sur les rapports entre l'interprétation pauvre (la première option que nous avons identifiée dans l'introduction) et les interprétations plus riches.

Existe-t-il une interprétation minimale de la mécanique quantique ?

- 24 Maintenant que nous avons donné quelques exemples d'interprétations « riches » de la mécanique quantique, il nous faut aborder la question de savoir si l'interprétation « pauvre » évoquée dans l'introduction, celle qui consiste à associer, par des règles strictes, les résultats des calculs aux résultats des mesures, mérite vraiment le nom d'« interprétation ». En effet, il semble que l'établissement d'un lien entre résultats de calculs prédictifs et résultats expérimentaux soit un acte intellectuel fort différent de celui qui consiste à faire des

hypothèses, à partir des équations de la théorie et des résultats expérimentaux, sur les entités et propriétés qui constituent le monde.

- 25 La discussion de la notion d'interprétation « pauvre » sera organisée selon trois étapes principales. Tout d'abord, nous insistons sur son statut d'instrument nécessaire à l'utilisation de la théorie. Ensuite, nous montrons que la condition pour qu'elle puisse remplir cette fonction instrumentale est de l'enrichir. Enfin, nous présentons une nouvelle analyse de la notion d'interprétation « minimale ». Nous montrons que même si on ne peut en rester à la notion que nous avons présentée dans l'introduction, il est cependant possible de défendre la thèse selon laquelle il existe bien une interprétation « minimale » de la mécanique quantique, qui peut servir de point de référence dans le débat entre les interprétations « riches ».

L'interprétation « pauvre » comme instrument nécessaire à l'utilisation de la théorie

- 26 Précisons pourquoi, à première vue, il semble qu'associer à la mécanique quantique l'interprétation « pauvre » ne puisse pas être considéré comme une entreprise de même nature que lui associer l'interprétation orthodoxe, celle de Bohm ou celle d'Everett. La première raison en est que l'interprétation « pauvre » ne semble pas capable de guider le physicien vers quelque compréhension que ce soit. Elle n'est qu'une condition nécessaire à l'utilisation des symboles et des équations à des fins de description, de prédiction et de contrôle des phénomènes. Cela ne semble pas suffire à la formation, dans l'esprit d'un physicien, d'une compréhension au sens plein du terme.
- 27 Il convient cependant d'approfondir la discussion. En effet, ce sont là des questions constitutives de la notion de théorie physique : quel rôle les théories jouent-elles pour le physicien au travail, aux prises avec les symboles et les équations d'une part, et les résultats d'expériences de l'autre ? Rappelons que les symboles et équations ne permettent à eux seuls aucune prédiction empirique. Pour le dire autrement, la pure et simple manipulation des symboles et équations ne permet aucunement de décider si la théorie est vraie ou fausse concernant les phénomènes étudiés, ni donc a fortiori d'apporter quelque compréhension que ce soit. Ce que nous avons appelé « interprétation pauvre » est précisément une condition nécessaire à une prise de décision quant à la question de savoir si la théorie est vraie ou fausse des phénomènes étudiés – même si l'interprétation « pauvre » n'offre aucun guide permettant de décider si la théorie est vraie « en général », c'est-à-dire pour ce qui concerne des aspects qui dépassent les résultats des expériences. Parmi ces aspects, on peut mentionner par exemple le caractère fondamentalement déterministe ou indéterministe des processus microscopiques. Ceux qui supposent que l'on peut décider qu'une théorie est vraie « en général » adoptent la position dite du « réalisme scientifique »⁸.
- 28 Comme nous l'avons dit plus haut, l'interprétation « pauvre » est un instrument nécessaire à l'usage de la théorie dans des buts de description, prédiction et contrôle des phénomènes, d'où la tentation de la qualifier d'« instrumentaliste ». Et en effet, on trouve une certaine proximité entre la thèse selon laquelle il faut en rester à l'interprétation « pauvre »⁹, sans s'aventurer sur le terrain des interprétations « riches », et les positions appelées « instrumentalistes », qui considèrent les théories elles-mêmes comme des instruments de description, de prédiction et de contrôle. On peut ainsi considérer la discussion proposée dans cet article comme un approfondissement du débat sur les positions instrumentalistes en général, visant à établir sur quels présupposés elles doivent reposer pour être cohérentes.

Vers un enrichissement de l'interprétation « pauvre »

- 29 L'étape suivante de la discussion consiste à se demander en quoi consiste précisément cet « instrument » qu'est l'interprétation « pauvre ». Son utilisation est-elle entièrement différente du fait d'associer des formules à une interprétation « riche » ? Pour répondre à ces questions, il est utile d'étudier une position radicale, celle selon laquelle une théorie physique n'a pas besoin d'interprétation. Un tel examen nous permettra, par contraste, de découvrir quels sont les constituants fondamentaux d'une interprétation.
- 30 La position selon laquelle une théorie physique n'a besoin d'être associée à aucune interprétation a été défendue à partir de deux types d'arguments, que nous allons présenter,

puis discuter, tour à tour. Le premier argument en faveur de la thèse selon laquelle il est inutile d'associer une interprétation à une théorie physique repose sur la distinction, introduite par Einstein (1919), entre « théories à principes » et « théories constructives ». Alors que les théories constructives nécessitent d'être interprétées pour pouvoir être utilisées, les théories à principes échappent à cette contrainte. Les théories à principes, selon la distinction d'Einstein, partent d'axiomes supposant l'existence d'entités fondamentales, à partir desquelles sont compris les phénomènes. Ainsi n'ont-elles pas d'interprétation au sens où on ne peut en leur sein séparer l'énoncé d'axiomes formulés dans le langage des mathématiques d'une couche de sens supplémentaire, pour ainsi dire, qui serait apportée par un acte interprétatif. C'est la raison pour laquelle certains considèrent que la tâche urgente n'est pas de chercher une interprétation pour la mécanique quantique, mais de reconstruire ses prédictions à partir des entités fondamentales¹⁰.

31 Avant de proposer une réponse à ce premier argument, passons rapidement en revue le second. Il repose sur l'intuition selon laquelle, pour qu'une théorie rende les services qu'elle est supposée rendre, il suffit de savoir comment comparer les résultats des calculs qu'elle autorise aux résultats des expériences¹¹. Une réponse immédiate est d'affirmer que c'est précisément une interprétation, certes « pauvre », qui indique comment comparer les résultats des calculs qu'elle autorise aux résultats des expériences. Pour dépasser la querelle terminologique, on peut noter que l'intuition mentionnée fait appel, davantage qu'à une série de règles de correspondance entre résultats des calculs et résultats des expériences, à un savoir-faire : pour utiliser la théorie, nul besoin de connaître des règles sur le sens des symboles (règles d'ailleurs difficiles à déterminer précisément).

32 Passons à présent à la discussion des deux arguments qui viennent d'être présentés. Le premier affirme qu'à partir du moment où l'on peut énoncer une série d'axiomes sur les entités fondamentales et leurs interactions, on est débarrassé de l'exigence de compléter les équations par un acte interprétatif. On peut cependant considérer que les théories à principes contiennent, au cœur de leurs axiomes, la vision du monde que les interprétations « riches » fournissent à la mécanique quantique. Au lieu d'être séparé des équations, le sens physique de la théorie est pour ainsi dire logé en leur sein. C'est la raison pour laquelle il ne semble pas que l'entreprise de reconstruction des théories physiques débouche sur des théories exemptes d'interprétation.

33 Quant au second argument, il appelle une discussion sur la notion d'utilisation d'une théorie à fin de description, prédiction et contrôle des phénomènes. La question à analyser est : « une telle utilisation (par des esprits humains) peut-elle se passer d'actes intellectuels visant à donner un sens physique aux symboles et aux équations ? ». Pour y répondre, il est nécessaire de s'entendre sur ce que veut dire « donner un sens physique ». Il semble qu'une condition minimale pour que cette expression soit douée de signification est de déterminer ce qui est susceptible de faire l'objet de prédictions grâce aux calculs gouvernés par les équations de la théorie. Or, comme nous y avons insisté dans la section 1, il n'est pas possible de s'en tenir à l'interprétation « pauvre » pour déterminer ce qui est susceptible de faire l'objet de prédiction ; on ne peut donc en rester à la neutralité interprétative. La détermination de ce sur quoi portent les prédictions est en effet une composante majeure des interprétations « riches ». On en voudra pour preuve que, selon l'interprétation « riche » adoptée, on considérera que ce sont les résultats de mesure ou, par exemple, les paris pris par des agents rationnels qui font l'objet des prédictions de la théorie.

34 Notre deuxième étape dans l'analyse de la notion d'interprétation « pauvre » nous conduit à un résultat inattendu. Afin de mieux comprendre ce dont le physicien a besoin pour utiliser une théorie, nous avons discuté la position selon laquelle il n'a pas besoin d'interprétation. Nous avons montré au terme de cette discussion qu'au contraire, il n'est pas possible de s'en tenir à l'interprétation « pauvre » pour la raison qu'avec la seule interprétation « pauvre », il n'est pas possible de déterminer ce sur quoi portent les prédictions de la théorie. Or si on n'a pas de moyen de savoir ce sur quoi portent les prédictions de la théorie, on ne peut l'utiliser.

Introduction de l'interprétation minimale de la mécanique quantique

- 35 La discussion de la section précédente débouche sur la thèse selon laquelle, pour utiliser la Mécanique Quantique, il ne suffit pas d'invoquer des règles strictes de correspondance entre résultats des calculs et résultats des expériences. Il faut en outre se donner les moyens de déterminer sur quoi portent les prédictions. Pour ce faire, on peut prendre parti pour l'une ou l'autre des interprétations « riches », qui défendent des options différentes sur cette question¹² ; et la question qui reste à trancher est celle de savoir s'il est nécessaire d'adopter une interprétation « riche », ou si on peut se contenter d'une interprétation minimale, qui serait en quelque sorte plus riche que l'interprétation « pauvre », mais moins riche que les interprétations présentées dans la section 1. Reste donc à savoir si on peut construire une notion d'interprétation minimale qui autorise l'utilisation des équations à des fins de description, prédiction et contrôle des phénomènes, c'est-à-dire s'il existe une interprétation de la mécanique quantique qui puisse servir de point de référence dans le débat sur les interprétations « riches »¹³.
- 36 Comme on l'aura pressenti, ce que nous proposons au titre d'une interprétation minimale de la Mécanique Quantique, c'est un ensemble de règles de correspondance complété par une clause spécifiant ce sur quoi portent les prédictions de la théorie. Ou, pour le dire autrement, un ensemble de règles de correspondance comprenant un moyen de déterminer ce sur quoi portent les prédictions de la théorie. Il nous semble que pour obtenir une telle interprétation minimale, il n'est pas nécessaire de supposer l'existence de quelque entité ou propriété que ce soit qui ne soit accessible par l'expérience : par exemple, il n'est pas nécessaire de supposer que les particules ont toujours des positions déterminées, ni que de nouveaux mondes apparaissent lors de chaque interaction quantique. Ainsi cette interprétation minimale pourra être qualifiée d'« instrumentaliste ». Il est cependant nécessaire de noter que le sens de cet « instrumentalisme » est différent du sens traditionnel, puisque l'adoption de l'interprétation minimale au sens que nous suggérons exige une prise de parti sur un aspect fondamental, à savoir le référent des prédictions de la théorie. Une position entièrement neutre vis-à-vis des éléments additionnels aux résultats d'expériences n'est pas tenable ; plus précisément, elle n'est pas tenable si l'on veut que la théorie remplisse sa fonction de description, prédiction et contrôle des phénomènes.
- 37 Sur quoi portent les prédictions de la théorie dans l'interprétation minimale que nous suggérons ? Il nous semble que la réponse la plus naturelle à cette question est qu'ils portent sur les résultats de mesure. En effet, les résultats de mesure sont ce à quoi le physicien au travail a un accès privilégié. Nous faisons donc l'hypothèse que les résultats de mesure sont des composants inéliminables du domaine de la théorie. Pour de nombreux physiciens, cette hypothèse va sans dire ; elle semble tellement aller de soi qu'ils ne songeraient même pas à lui donner le statut d'une hypothèse particulière. La discussion que nous avons menée précédemment conduit cependant à l'identifier comme une authentique hypothèse interprétative, au sens où d'autres hypothèses de ce type sont possibles (par exemple, l'hypothèse selon laquelle ce sont les paris d'agents rationnels qui font partie du domaine de la théorie).
- 38 Trois remarques sont à présent nécessaires pour compléter notre conception de l'interprétation minimale de la mécanique quantique. Premièrement, elle est minimale au sens où on peut l'enrichir par d'autres éléments interprétatifs, mais on ne peut rien lui ôter si l'on veut obtenir une théorie scientifique vraiment utilisable. Deuxièmement, on peut envisager d'autres types d'interprétations minimales de la mécanique quantique au sens où nous entendons cette expression, à savoir des interprétations dans lesquelles les prédictions ne porteraient pas sur des résultats de mesure mais sur d'autres éléments, qui seraient alors conçus comme faisant partie du domaine de la théorie (comme par exemple les paris d'agents rationnels). Pour le dire autrement, nous ne prétendons pas que l'interprétation minimale que nous proposons est unique ; nous soulignons simplement qu'elle est en accord avec ce que nous avons appelé « l'interprétation orthodoxe des manuels ».
- 39 Pour finir, il nous semble utile de revenir, au vu des deux paragraphes qui précèdent, sur le rapport entre notre thèse, selon laquelle il est possible de compléter les équations de la

mécanique quantique par une interprétation minimale, et la position instrumentaliste. Ce que nous affirmons, c'est qu'il est possible d'adopter une interprétation minimale de la Mécanique Quantique qui ne requiert aucune hypothèse sur des entités ou des propriétés autres que celles nécessaires à la lecture des résultats des instruments de mesure. En particulier, l'interprétation minimale que nous proposons ne requiert pas d'hypothèses sur des entités ou des propriétés microscopiques qui expliqueraient les résultats de mesure. Nous n'affirmons pas qu'il faille adopter cette interprétation minimale (ou quelque autre interprétation minimale que ce soit), mais simplement qu'il existe une interprétation de la mécanique quantique qui est compatible avec une forme d'instrumentalisme.

Conclusion

40 Au terme de cette discussion de la notion d'interprétation d'une théorie physique, que nous avons centrée sur l'exemple de la mécanique quantique, nous avons montré que la distinction initialement proposée entre interprétation « pauvre » et interprétation « riche » devait être amendée pour tenir compte des conditions auxquelles les théories physiques peuvent être utilisées pour décrire, prédire et contrôler les phénomènes. La notion d'interprétation « pauvre » que nous avons envisagée, qui consiste en l'ajout aux formules de la théorie de règles de correspondance entre résultats des calculs et résultats des expériences, est insuffisante pour que les théories remplissent leur rôle. C'est en examinant le contraste entre cette interprétation « pauvre » et les interprétations « riches » de la mécanique quantique qui font débat depuis près de quatre-vingts ans que nous avons établi que, pour ce qui concerne la mécanique quantique, les règles de correspondance doivent être complétées par une clause indiquant sur quoi portent les prédictions de la théorie pour que l'on dispose d'une théorie utilisable.

41 Une question reste cependant ouverte : celle de savoir si l'interprétation minimale de la mécanique quantique que nous avons présentée suffit à répondre au besoin de compréhension qui anime certains physiciens. Peut-on parvenir à se former une image cohérente du monde microscopique à l'aide de l'interprétation minimale de la mécanique quantique ? Pour répondre à cette question, il faudrait considérer plus en détail les hypothèses nécessaires au bon fonctionnement des instruments de mesure, et en particulier des instruments récents. Cette entreprise dépasse les limites de cet article.

Bibliographie

Albert, D. Z., *Quantum Mechanics and Experience*, Cambridge, MA et Londres, Harvard University Press, 1992.

Belousek, D. W., « Formalism, Ontology and Methodology in Bohmian Mechanics », *Foundations of Science*, 8, 2003, p. 109-172.

Bohm, D., « A Suggested Interpretation of Quantum Theory in terms of 'Hidden' Variables », *Physical Review*, 85, 1952, p. 166-193.

Boyd, R. N., « On the Current Status of the Issue of Scientific Realism », *Erkenntnis*, 19, 1983, p. 45-90.

Carnap, R., *Les Fondements Philosophiques de la Physique*, trad. franç. de J.-M. Luccioni et A. Soulez, Paris, Armand Colin, 1973. Ed. orig. : *Philosophical Foundations of Physics*, New-York, Basic Books, 1966.

Cohen-Tannoudji, C., Diu, B. et Laloë F., *Mécanique quantique*, Tome 1, Paris, Hermann, 1ère éd. 1973 ; éd. rev. et augm., 1998.

Dirac, P. A. M., *The Principles of Quantum Mechanics*, Oxford, Clarendon Press, 1930.

Dürr, D. & Teufel, S., *Bohmian Mechanics: The Physics and Mathematics of Quantum Theory*, Springer, 2009.

Einstein, A., « What is the Theory of Relativity ? », lettre au London Times, 28 novembre 1919, reproduite dans *Ideas and Opinions*, New-York, Crown Publishers, 1954, p. 227-232.

Everett, H., « 'Relative State' Formulation of Quantum Mechanics », *Reviews of Modern Physics*, 29, 1957, p. 454-462.

Fuchs, C.A. & Peres, A., « Quantum Theory Needs No "Interpretation" », *Physics Today* 53(3), 2000, p. 70.

- Goldstein, S., « Bohmian Mechanics », in E. N. Zalta (ed.), *The Stanford Encyclopedia of Philosophy* (Spring 2009 Edition), <http://plato.stanford.edu/archives/spr2009/entries/qm-bohm/>
- Gottfried, K. et Yan, T.-M., *Quantum Mechanics: Fundamentals*, New-York, Springer-Verlag, 2003.
- Griffiths, D. J., *Introduction to Quantum Mechanics*, sec. ed., Pearson Prentice Hall, 2004.
- Grinbaum, A., « Reconstruction of Quantum Theory », *British Journal of Philosophy of Science*, 58, 2007, p. 387-408.
- Leplin, J., *A Novel Defence of Scientific Realism*, Oxford, Oxford University Press, 1997.
- Peres, A., *Quantum Theory: Concepts and Methods*, Kluwer Academic Publishers, 1993.
- Shankar, R., *Principles of Quantum Mechanics*, sec. ed., New York, Plenum Press, 1994.
- von Neumann, J., *Mathematical Foundations of Quantum Mechanics*, Princeton, NJ, Princeton University Press, 1955 ; 1ère publication en allemand, *Mathematisch Grundlagen der Quantenmechanik*, Berlin, Springer, 1932.
- Wallace, D., « The Quantum Measurement Problem: State of Play », in D. Rickles (ed.), *The Ashgate Companion to Contemporary Philosophy of Physics*, Aldershot, Ashgate Publishing, 2008, p. 16-98, arXiv : quant-ph/0712.0149v1.

Notes

- 1 Les manuels de référence sont notamment ceux de Griffiths (2004), Cohen-Tannoudji *et al* (1998), Gottfried et Yan (2003) et Shankar (1994). Ils peuvent être considérés comme des héritiers de ceux de Dirac (1930) et de von Neumann (1935).
- 2 Cohen-Tannoudji *et al* (1998), p. 19.
- 3 Dans l'interprétation orthodoxe de la mécanique quantique, le hasard s'immisce dans un type d'interaction particulier, qu'on appelle une « mesure », entre le système quantique et un appareil macroscopique (un détecteur de particules, par exemple). Nous ne souhaitons pas entrer davantage dans ces détails ici, qui ont fait l'objet d'amples discussions depuis 1925.
- 4 On appellera ici « système classique » un système décrit par une théorie autre que la Mécanique Quantique. Un système classique est de taille macroscopique, c'est-à-dire très grande par rapport aux distances spécifiques des interactions quantiques.
- 5 Nous prenons ici les deux appellations, « interprétation d'Everett » et « interprétation des mondes multiples », pour synonymes, conformément à notre souhait de ne pas entrer dans le détail des différentes versions des interprétations.
- 6 Un « lancer de pièce quantique » peut être réalisé au laboratoire sous la forme de mesures de spin sur des électrons ou de mesure de polarisation sur des photons, dans des états de superposition appropriés.
- 7 Pour davantage de détails concernant l'interprétation de Bohm, nous renvoyons à Albert (1992), chapitre 7, Bohm (1952), Dürr et Teufel (2009), Goldstein (2006) et Wallace (2008), section 6. Diverses versions et raffinements de l'interprétation bohémienne sont par exemple discutés dans Belousek (2003) ou Wallace (2008), section 6.
- 8 Voir par exemple Boyd (1983) et Leplin (1997).
- 9 L'un des plus célèbres défenseurs de cette thèse, pour le cas général, est Carnap (1966/1973).
- 10 Voir par exemple Grinbaum (2007).
- 11 Voir Fuchs et Peres (2000), intitulé « Quantum Mechanics Needs no Interpretation ».
- 12 Une façon légèrement différente de présenter ce résultat est de dire que pour que les règles de correspondance remplissent leur rôle, il faut leur adjoindre une clause permettant de déterminer ce sur quoi portent les prédictions de la théorie.
- 13 Notons qu'il ne s'agit pas de chercher une *intersection* de ces différentes interprétations « riches ».

Pour citer cet article

Référence électronique

Thomas Boyer et Anouk Barberousse, « Interpréter une théorie physique », *Methodos* [En ligne], 13 | 2013, mis en ligne le 11 mars 2013, consulté le 23 avril 2013. URL : <http://methodos.revues.org/3118> ; DOI : 10.4000/methodos.3118

À propos des auteurs

Thomas Boyer

Université Lille 1, UMR 8163 Savoirs, Textes, Langage, CNRS-Universités Lille 3 et Lille 1 & UMR 7117 Archives Henri Poincaré, CNRS-Université de Lorraine

Anouk Barberousse

Université Lille 1, UMR 8163 Savoirs, Textes, Langage, CNRS-Universités Lille 3 et Lille 1

Droits d'auteur

Tous droits réservés

Résumés

Les théories physiques sont aujourd'hui très mathématisées, et ce que les scientifiques manipulent pour décrire, prédire et contrôler les phénomènes, ce sont (entre autres) des équations, comportant de nombreux symboles mathématiques. Ces objets mathématiques n'ont pas de signification physique en eux-mêmes : ils ne « parlent » pas d'eux-mêmes des phénomènes. Une interprétation est nécessaire. Ce qui nous intéresse dans cet article est ainsi l'interprétation dont une théorie physique doit faire l'objet pour remplir son rôle. Nous commençons par expliciter une distinction traditionnelle : l'interprétation « pauvre » (simple instrument permettant d'assigner aux symboles de la théorie un sens physique strictement limité aux résultats des expériences) diffère de l'interprétation « riche » (laquelle compose une image du monde compatible avec la façon dont la théorie décrit mathématiquement les résultats des expériences). Notre but dans cet article est de montrer que cette distinction doit être amendée. Nous nous appuyons sur l'exemple de la mécanique quantique, mais la distinction se veut valable en général pour toute théorie physique.

Physical theories are nowadays very mathematized, and what scientists manipulate so as to describe, predict and control the phenomena, are (in part) equations, which consist in many mathematical symbols. These mathematical objects don't have any physical signification by themselves: they don't “speak” about the phenomena. An interpretation is required. In this article, we are interested in the interpretation which a physical theory needs so as to fulfill its role. We start by making explicit a traditional distinction: the “lean” interpretation (a simple instrument which allows the symbols of the theory to receive a physical meaning, strictly limited to the experimental results) differs from the “rich” interpretation (which makes up an image of the world compatible with the way the theory mathematically describes the experimental results). Our aim in this article is to show that this distinction should be amended. We rely on the example of Quantum Mechanics, but the distinction intends to be general, for any physical theory.

Entrées d'index

Index de mots-clés : interprétation, mécanique quantique, signification, symboles, théorie physique

Index by keyword : interpretation, meaning, physical theory, quantum mechanics, symbols