Institutional Repository - Research Portal
Dépôt Institutionnel - Portail de la Recherche
researchportal.unamur.be
University of Namur

RESEARCH OUTPUTS / RÉSULTATS DE RECHERCHE

Quel sens donner à la mécanique quantique ?

Caudano, Yves

Published in:
Revue des Questions Scientifiques

Publication date:
2019

Document Version
Version revue par les pairs

Link to publication

Citation for pulished version (HARVARD):
Caudano, Y 2019, 'Quel sens donner à la mécanique quantique ? Une perspective physique, philosophique et historique guidée par la théorie de de Broglie-Bohm', *Revue des Questions Scientifiques*, vol. 190, numéro 3-4, pp. 409.

General rights
Copyright and moral rights for the publications made accessible in the public portal are retained by the authors and/or other copyright owners and it is a condition of accessing publications that users recognise and abide by the legal requirements associated with these rights.

- Users may download and print one copy of any publication from the public portal for the purpose of private study or research.
- You may not further distribute the material or use it for any profit-making activity or commercial gain
- You may freely distribute the URL identifying the publication in the public portal ?

Take down policy
If you believe that this document breaches copyright please contact us providing details, and we will remove access to the work immediately and investigate your claim.

Download date: 02. Jul. 2025

Analyse critique

Quel sens donner à la mécanique quantique ?
Une perspective physique, philosophique et historique guidée par la théorie de de Broglie-Bohm

Yves Caudano

Département de Physique
Université de Namur
Rue de Bruxelles, 61
B – 5000 Namur
yves.caudano@unamur.be

Bricmont (Jean), Quantum sense and nonsense. – [s. l.] : Springer International Publishing, 2017. – x, 286 p. – 1 vol. électronique. – 23,79 €. – isbn 978-3-319-65271-9.

Bricmont (Jean), Making sense of quantum mechanics. – [s. l.] : Springer International Publishing, 2016. – x, 331 p. – Un vol. électronique. – 41,64 €. – isbn 978-3-319-25889-8.

Quelle interprétation donner à la mécanique quantique ? À lire et entendre les vifs débats contradictoires entre les partisans des différentes écoles de pensée, chacun saisira qu'il s'agit de l'une des grandes questions demeurant encore sans réponse reconnue en physique et pour laquelle aucun consensus ne semble s'établir, malgré le centenaire des fondations quantiques. La mécanique quantique est la théorie fondamentale des constituants élémentaires de la nature, souvent présentée — de façon réductrice — comme l'ensemble des lois physiques régissant le monde microscopique. L'exposition usuelle des apports de la mécanique quantique insiste sur la rupture radicale qu'impose cette théorie au regard de notre conception antérieure des lois de la nature. Le monde de la vie quotidienne et la physique pré-quantique ou tout simplement non quantique sont dans la foulée relégués à un statut aseptisé et qualifiés de « classiques ». Le contraste irréductible entre les propriétés à première vue mystérieuses conférées au monde quantique et celles familières du monde classique a mené le prix Nobel de physique Richard Feynman à proclamer que « personne ne comprend la mécanique quantique ». Il n'affirme pas de la sorte que les physiciens ne maîtrisent pas le formalisme quantique et ses règles. Au contraire, la mécanique quantique est l'une des théories physiques qui a engrangé le plus de succès, prédisant nombre d'observations avec une précision inégalée. Il ne décrit pas non plus des physiciens tâtonnant à l'aveugle au sein de la théorie. La pratique confère une intuition fidèle aux prédictions du formalisme sur les phénomènes quantiques et leurs observations. À travers cette formulation simultanément provocatrice et humble, Feynman suggère une impuissance contemporaine des physiciens à appréhender l'ontologie des phénomènes quantiques. En particulier, il se réfère au constat d'un échec supposé, celui d'expliquer par des mécanismes d'horlogerie classiques, accessibles à notre entendement, les phénomènes typiquement quantiques. Autrement dit, il affirme

que, malgré l'exploitation fructueuse du formalisme quantique, la signification naturelle de la théorie quantique nous échappe encore.

Les deux ouvrages rédigés par Jean Bricmont *Making sense of quantum mechanics* et *Quantum sense and nonsense* sont étroitement liés. Ils s'attaquent résolument à l'idée qu'il serait impossible de donner un sens rationnel — pour reprendre les mots de l'auteur — à la mécanique quantique. Jean Bricmont entend lever le voile du mystère quantique pour ancrer dans la réalité une physique quantique qui lui paraît à la dérive : la pique de Feynman n'est pas une fatalité. Il pourfend également les excès d'une popularisation abusive des concepts quantiques, qui alimente des pseudosciences ou verse dans le mysticisme quantique, une situation dont il tient les physiciens pour en partie responsables.

Ces deux ouvrages aux objectifs similaires se distinguent avant tout par leur public cible et par leur approfondissement des thématiques abordées. *Making sense of quantum mechanics* s'adresse à un lectorat plus spécialisé, possédant une certaine aisance avec le formalisme mathématique de la mécanique quantique : typiquement des physiciens, des mathématiciens ou des philosophes des sciences. Notons qu'il ne vise pas spécialement les experts des fondements de la mécanique quantique ; il est approprié à un public scientifique large, notamment étudiant, s'interrogeant sur la question de l'interprétation de la mécanique quantique et s'intéressant aux débats philosophiques et historiques y afférant. *Quantum sense and nonsense* est en revanche à destination du grand public. Ce dernier livre apparaît comme une version concise et expurgée du formalisme du premier, de surcroit adaptée pour en faciliter la compréhension. Certains passages requièrent du lecteur une familiarité avec les raisonnements scientifiques afin de suivre aisément les déductions de l'auteur. Quelques sections font appel à des notions mathématiques considérées simples (ceci est laissé au jugement de chacun), ce qui pourrait entraîner des lecteurs hors de leur zone de confort. Ces illustrations mathématiques guident l'assimilation du fonctionnement du formalisme quantique, mais ne sont pas indispensables pour en appréhender les lignes directrices.

Un aspect attrayant et ambitieux de ces livres, qui témoigne de l'érudition de l'auteur, est le regroupement en leur sein d'observations d'ordres physique, philosophique et historique. Ces thématiques se révèlent d'ailleurs dès le parcours de la table des matières, où l'on découvre des chapitres consacrés plus spécifiquement aux thématiques philosophiques ou historiques, en sus de la physique quantique proprement dite et de son interprétation. De façon très caractéristique, l'auteur exploite abondamment des citations de grands physiciens et de figures historiques de la mécanique quantique, pour illustrer ses idées et argumenter. Son travail repose d'ailleurs sur une bibliographie étoffée, reprenant plus de cinq cents références pour l'ouvrage plus spécialisé et ramenée à environ deux cents pour l'autre.

D'emblée, le ton est posé. En effet, avec un titre grand public *Quantum sense and nonsense* contrastant approche sensée de la mécanique quantique et inepties quantiques, ainsi qu'un chapitre d'ouverture de l'ouvrage spécialisé intitulé *Physicists in Wonderland*, autrement dit « les physiciens au pays des Merveilles », l'auteur ne laisse planer aucun doute sur le fond de sa pensée quant aux déclarations qu'il juge extravagantes ou insensées à propos de la mécanique quantique. Sa critique est dure, caustique, et n'épargne quasiment personne : pères fondateurs de la mécanique quantique, prix Nobel, physiciens célèbres, tout qui n'exprimerait pas une vision claire et raisonnable de la signification de la théorie quantique,

de sa portée, de son interprétation. Peu importe que les physiciens semblent n'y point parvenir depuis un siècle, tant ces questions sont complexes et déroutantes lorsqu'on se fie à son intuition classique ! Et pourtant — comme on le verra — c'est bien là son message : la prééminence de phénomènes soi-disant mystérieux, les concepts et propos nébuleux, les postures considérées aberrantes ne sont pas nécessaires, car il existe une interprétation de la mécanique quantique évitant tous ces écueils, à savoir la théorie de de Broglie–Bohm. Avoir banni ces discours dès que ce fût historiquement possible aurait, au contraire, évité bien des dérives et illuminé l'enseignement de la mécanique quantique. Nul besoin d'être spécialiste pour apprécier la nature du problème considéré par l'auteur. À l'aide de nombreuses citations chocs, qui incriminent inopinément leurs auteurs (incluant nombre de physiciens respectables et respectés), Jean Bricmont introduit le profane aux problèmes conceptuels typiquement associés à la mécanique quantique. Il explique les difficultés d'interprétation qu'elle soulève, notamment dans le cadre de ce qu'on dénomme l'école de Copenhague, et souligne les révolutions paradigmatiques qui lui sont attribuées à tort ou à raison dans la littérature. Ainsi, pour reprendre quelques exemples emblématiques décriés par l'auteur, cette théorie signifierait la mort de la réalité objective ; elle indiquerait que la science étudie non la réalité, mais notre connaissance de celle-ci ; elle justifierait l'intervention de la conscience au sein des processus physiques ; elle prouverait qu'aucune conception déterministe de la physique n'est désormais envisageable. De façon synthétique, l'auteur identifie trois enjeux fondamentaux de la théorie : le rôle anthropocentrique de l'observateur, qui devient prépondérant lors d'une mesure quantique, alors qu'il est pertinemment absent du cadre de la physique classique ; la question du déterminisme à l'aune des prédictions statistiques de la théorie à l'issue de mesures ; et le problème de la localité en mécanique quantique, mise à l'épreuve par le formalisme, car il suggère la possibilité d'actions instantanées à distance, révélatrices d'une forme de non-localité.

Afin que tout un chacun puisse se forger une opinion sur les mérites de la solution prônée par Jean Bricmont, les ouvrages incluent une présentation étoffée de deux phénomènes quantiques de prime abord mystérieux : les interférences et la non-localité. L'approche ici est relativement traditionnelle afin — justement — de mettre en évidence la difficulté d'appréhender les phénomènes quantiques selon les schémas d'interprétation usuels. L'auteur précise d'emblée que la non-localité des phénomènes quantiques est cependant loin d'être généralement acceptée par les physiciens, même si de son point de vue cette conclusion est inéluctable. Notons que le choix délibéré de la non-localité comme second mystère, plutôt qu'une notion connexe non controversée telle que l'intrication, anticipe la voie suivie par l'auteur pour élucider les énigmes quantiques.

Au moyen de multiples situations simples, l'auteur expose toutes les difficultés conceptuelles à appréhender d'un point de vue ontologique les phénomènes quantiques associés aux interférences de particules, qu'il s'agisse de déterminer la trajectoire suivie par la particule ou de lui attribuer certaines propriétés intrinsèques, tel le spin. L'ouvrage grand public aborde ces questions par le biais de l'expérience des deux fentes, tandis que l'ouvrage spécialisé traite directement des mesures de spin alliées à la propagation des particules au sein d'interféromètres simples. Dans un second temps, l'auteur explique comment le formalisme de la mécanique quantique, en particulier la notion mathématique de fonction d'onde ou d'état quantique de spin, prédit les observations décrites précédemment. Le formalisme combine l'évolution temporelle linéaire, déterministe, de la fonction d'onde qu'engendre

l'équation de Schrödinger, à l'évolution non linéaire, probabiliste, que provoque une mesure du système quantique par un observateur. Quand l'équation de Schrödinger régente également l'évolution de l'appareil de mesure, les superpositions quantiques se transmettent au monde macroscopique, ce que symbolise le chat de Schrödinger. A priori, ce félin à la fois mort et vivant incarne l'absurdité des prédictions quantiques prises à la lettre, puisque, en pratique, seuls s'observent des chats soit morts, soit vivants. Dès lors se pose la question de l'interprétation physique de la fonction d'onde et de la complétude de la théorie quantique : la description d'un système quantique par la fonction d'onde pourrait-elle être complétée par des informations supplémentaires, tels le caractère préexistant « vivant » ou « mort » du chat ou la position des particules ? Les prédictions probabilistes de la mécanique quantique résulteraient-elles juste de notre ignorance de ce que le jargon quantique appelle des « variables cachées », c'est-à-dire des propriétés que la fonction d'onde ne détermine pas ? L'auteur met cependant en garde le lecteur contre une interprétation naïve de la fonction d'onde en termes statistiques. En effet, des théorèmes excluent les types de variables cachées les plus intuitives, que ce soit pour expliquer les résultats probabilistes de mesures de positions et de vitesses ou de mesures de spin.

Le second mystère quantique, la non-localité, émerge via deux situations phares associées à ce débat, que les spécialistes connaissent sous le nom du paradoxe EPR et de la violation des inégalités de Bell. L'auteur soutient que la combinaison de ces deux expériences implique que le monde est non local. Il illustre le paradoxe EPR au moyen des boîtes d'Einstein : deux boîtes fermées placées à grande distance l'une de l'autre, qui contiennent une seule particule dans un état superposé tel qu'on trouve la particule avec une chance sur deux lors de l'ouverture d'une boîte. L'auteur affirme que, pour préserver la localité en physique, il faut que la particule ait été préalablement localisée dans la boîte qui la contient après ouverture, c'est-à-dire que les variables cachées sont nécessaires : l'alternative étant que l'ouverture d'une boîte « projette » instantanément à distance la particule dans l'une des boîtes, ce qui correspond à de la non-localité. Il décrit ensuite une situation anthropomorphique, le jeu de Bell, et l'expérience quantique associée, lesquelles font intervenir des observations en deux lieux éloignés, dont les résultats sont corrélés d'une manière bien plus forte que ce que permet la physique classique en supposant la localité de la nature. Les corrélations classiques obéissent au théorème de Bell, que violent les corrélations quantiques. Dans le cadre quantique, ce théorème établit l'incompatibilité de la localité et des variables cachées. Aux yeux de l'auteur, il n'y a dès lors pas d'échappatoire à la non-localité : l'expérience EPR prise isolément requiert des variables cachées pour préserver la localité, mais Bell établit que les variables cachées sont incompatibles avec la localité. Ceci mérite un commentaire puisque, de l'aveu de l'auteur lui-même, la non-localité n'est pas acceptée de manière générale par les physiciens et que l'un des ouvrages s'adresse à des non-spécialistes. Admettre la non-localité constitue une révolution conceptuelle et exige donc des preuves expérimentales indéniables pour convaincre bon nombre de physiciens. Le théorème de Bell est de bien plus grande portée que le paradoxe EPR. En effet, il se prouve indépendamment de la théorie quantique et sa violation est vérifiée par l'expérience. Il nous renseigne directement sur la nature elle-même. La partie EPR de l'argument s'inscrit, elle, au sein du formalisme quantique. À ce jour, il manque encore une preuve expérimentale de la non-localité qui découlerait d'un critère d'exclusion fermement établi, comme le fait irréfutablement le théorème d'incompatibilité de Bell. Quelle

que soit l'opinion qu'on se forge au vu des indices de non-localité, le mystère reste néanmoins bien présent.

Avant de démystifier la mécanique quantique, l'auteur précise sa conception philosophique de ce que signifie faire de la science, avec, en toile de fond, les questions soulevées par la théorie quantique et son interprétation, en connexion avec les notions de déterminisme et de hasard. L'existence d'une réalité objective en dehors de la pensée revêt un caractère primordial à ses yeux. Ne plus parler du monde en soi, mais seulement de nos interactions avec celui-ci constituerait une grande défaite de la science. Ainsi, s'exprimant à propos du réalisme, de l'idéalisme et même du solipsisme, il conclut que les physiciens se doivent d'être réalistes. À la lecture des ouvrages, l'on ressent que sa conception philosophique du monde et de la science a joué un rôle prépondérant dans sa préférence d'une interprétation particulière de la mécanique quantique, la théorie de de Broglie–Bohm, car ces deux visions s'accordent en harmonie.

Dans la théorie de de Broglie–Bohm, les particules quantiques possèdent des trajectoires définies. Comment les interférences s'expliquent-elles alors pour les particules ? L'onde et la particule coexistent : la fonction d'onde, qui peut se propager selon plusieurs chemins et interférer, guide la particule le long de sa trajectoire, d'où son nom « d'onde-pilote ». La théorie est déterministe et la notion d'observateur n'occupe plus de rôle central. Elle prédit cependant les mêmes résultats statistiques lors de mesures que la mécanique quantique usuelle, en raison d'une méconnaissance des positions initiales des particules. Le prix à payer est l'apparition inévitable de la non-localité, puisqu'il s'agit d'une théorie où les positions des particules jouent le rôle de variables cachées. Aux yeux de l'auteur, il s'agit cependant d'une qualité, puisqu'elle explicite la non-localité, qu'il considère avérée en mécanique quantique. De façon surprenante, les mesures quantiques de spin ou de vitesse ne révèlent pas des valeurs préexistantes de ces propriétés des particules. Les valeurs observées émergent d'une analyse des trajectoires, ce qui évite à la théorie le couperet des théorèmes d'exclusion des variables cachées d'interprétation statistique la plus intuitive. Étape par étape, l'auteur montre le pouvoir explicatif de la théorie de de Broglie–Bohm et sa capacité à résoudre des difficultés identifiées de la mécanique quantique usuelle. En éliminant le problème de la mesure de la mécanique quantique, la théorie permet selon l'auteur de se consacrer à l'étude du vrai mystère de la nature : la non-localité. Ce parcours est une invitation à poursuivre l'exploration de la théorie, les connaissances de l'auteur et le développement de la théorie dépassant visiblement le contenu de ces livres, qui, faut-il le préciser, ne sont pas des traités de mécanique bohmienne. Sur ce point, l'ouvrage plus technique exaucera la curiosité des esprits théoriciens, car il montre la connexion entre le formalisme et les concepts, notamment comment définir la vitesse des particules à partir de la fonction d'onde afin d'établir leurs trajectoires.

Au vu de tous les atouts conférés à la théorie de de Broglie–Bohm par ses partisans, pourquoi n'est-elle pas davantage diffusée et reconnue ?

Pour Jean Bricmont, la réponse se trouve pour beaucoup dans l'histoire de la mécanique quantique. La question de la localité en mécanique quantique était au cœur des préoccupations d'Einstein bien avant l'article EPR selon l'auteur, mais Einstein ne fut pas compris, ce qu'il illustre en revisitant le débat Einstein–Bohr sous cet angle. Il explique que les idées de de Broglie furent mal accueillies par l'école de Copenhague, ce qui amena de Broglie

à abandonner sa théorie. Quant à Bohm, il ne parvint pas à imposer ses vues et fut ignoré pour ses opinions politiques dans le contexte du maccarthysme. Enfin, il accuse aussi les mauvaises interprétations du théorème de Bell, souvent réduit à une preuve de l'impossibilité des variables cachées, alors qu'il signifie seulement leur incompatibilité avec la localité.

De plus, il existe des interprétations alternatives de la théorie quantique, qui, elles aussi, ont leurs partisans convaincus. Clairement, toutes les interprétations possèdent leurs problèmes techniques non résolus et, dès lors, les conceptions philosophiques de leurs défenseurs jouent un rôle dans leurs préférences. L'auteur discute une série représentative d'entre-elles et explique en quoi elles ne trouvent pas grâce à ses yeux. Sans tomber dans un relativisme aveugle, rejeter une interprétation sur base de difficultés techniques, qui pourraient se révéler temporaires, est un risque. L'auteur reconnaît d'ailleurs les difficultés que peut rencontrer la théorie de de Broglie–Bohm : par exemple, la non-localité crée une tension avec la conception einsteinienne de la théorie de la relativité. L'auteur botte cependant en touche en pointant cette tension dans la mécanique quantique usuelle. Il offre également des contre-arguments à des objections couramment portées contre la théorie de de Broglie–Bohm.

À titre personnel, je me risquerais — sachant pertinemment que l'auteur aura réponse à ces critiques — à ajouter que la non-localité explicite de la théorie reste une pierre d'achoppement, au moins tant que celle-ci ne sera pas communément admise. D'autre part, l'ontologie de l'onde-pilote ne coule pas de source, puisque cette onde ne se propage pas dans l'espace physique tridimensionnel, mais bien dans un espace de configuration mathématique abstrait. Enfin, la théorie de de Broglie–Bohm fournit une description possible des mécanismes sous-tendant la mécanique quantique, ce qui lui confère un sens la rapprochant des points de vues classiques, mais elle ne nous informe pas sur la signification naturelle de la théorie quantique. À ce jour, la mécanique quantique ne se déduit d'aucun principe fondateur identifié, qui jouerait un rôle similaire à celui de la constance de la vitesse de la lumière en relativité restreinte.

Les ouvrages scrutent aussi l'impact culturel de la mécanique quantique et ses pires excès aux yeux de l'auteur. Il s'attaque aux pseudosciences, aux mysticismes, aux invocations religieuses de la mécanique quantique, aux abus en sciences humaines, ainsi qu'aux récupérations idéologiques et politiques. Pour l'auteur, les scientifiques portent une part de responsabilité dans ces exploitations irrationnelles de la science, car ils ont permis l'émergence d'un débat sur la disparition supposée de l'objectivité ou de la réalité qu'impliquerait la mécanique quantique.

D'une manière générale, l'on peut regretter l'impression que donne l'auteur de s'être lancé dans une croisade en faveur de la théorie de de Broglie–Bohm, contre une irrationalité ambiante généralisée en physique, voire même contre des fantômes du passé. Beaucoup d'eau a, en effet, coulé sous les ponts depuis l'époque de Bohr, de l'ostracisme subi par Bohm ou de la confidentialité des travaux de Bell. Cela déforce son propre argument, car on est parfois tenté de douter de son objectivité. Il possède une vision du monde et semble vouloir prouver que la mécanique quantique peut s'y conformer. Par moment, l'on pourrait souhaiter une approche plus neutre, où la nature nous informe de ce qu'elle est. Quoi qu'il en soit, au final, la théorie de de Broglie–Bohm résout élégamment des questions fondamentales soulevées par la mécanique quantique et, quelle que soit l'opinion qu'on se forgera sur la pertinence de cette théorie en tant qu'ontologie, elle offre une voie alternative, intéressante,

d'investigation des phénomènes quantiques. Elle mérite sans conteste d'être mieux connue, même s'il faut reconnaître que dans le contexte actuel de la « seconde révolution quantique », toutes les questions liées aux fondements de la mécanique quantique, autrefois à la marge, ont désormais bien davantage de visibilité.

Ces livres sont chaudement recommandés à tout qui s'interroge sur la signification et les fondements de la mécanique quantique et n'est pas prêt à acheter un chat vivant et mort dans un sac.

Remerciements

Yves Caudano est chercheur qualifié du Fonds de la recherche scientifique F.R.S.-FNRS. Ce travail a bénéficié du soutien de l'action de recherche concertée WeaM de l'Université de Namur.