

*Mathieu Guillermin*

---

**COMPTE RENDU:  
MICHEL GONDRAN ET  
ALEXANDRE GONDRAN  
2014.  
*MÉCANIQUE QUAN-  
TIQUE : ET SI EINSTEIN  
ET DE BROGLIE AVAIENT  
AUSSI RAISON ?***





Mathieu Guillermin

**COMPTE RENDU :**

**MICHEL GONDRAN ET ALEXANDRE GONDRAN  
 2014. MÉCANIQUE QUANTIQUE : ET SI EINSTEIN  
 ET DE BROGLIE AVAIENT AUSSI RAISON ? PARIS :  
 EDITIONS MATÉRIOLOGIQUES.**

La *grande* histoire de l'émergence de la mécanique quantique est célèbre, c'est le récit d'une révolution scientifique. À l'aube du 20<sup>e</sup> siècle, les derniers nuages dans le ciel de la physique classique se transforment en ouragans. S'ouvre une période de tension (Kuhn dirait une phase extraordinaire ou une crise) durant laquelle l'ancien paradigme classique s'oppose à la nouvelle mécanique quantique en cours d'élaboration. Marquée par la controverse autour de la complétude de la mécanique quantique, cette phase de crise culmine notamment avec le congrès de Solvay (1937). D'un côté, l'école de Copenhague – avec de nombreux pères fondateurs comme Born, Bohr, Heisenberg ou Pauli – soutient que l'information fournie par la fonction d'onde est exhaustive et qu'il faut abandonner déterminisme et réalisme classiques. À l'opposé, Einstein, de Broglie et d'autres défendent le déterminisme et le réalisme en invoquant l'idée d'une sous-structure qui échapperait au formalisme de la fonction d'onde (on parle de variables « cachées »). Au fil du temps et des découvertes théoriques ou expérimentales (comme le théorème de Von Neumann ou la violation expérimentale des inégalités de Bell), Einstein et la pensée classique résiduelle s'effacent tandis que l'école de Copenhague s'impose définitivement. La révolution scientifique est accomplie, la physique quantique est complète. Fondamentalement, le monde est non-déterministe. Les propriétés des particules (position, vitesse...) ne sont pas précisément déterminées indépendamment des processus de mesure.

Une des principales forces de l'ouvrage de Michel Gondran et Alexandre Gondran est de revenir sur la *petite* histoire de la mécanique quantique. Ce geste nous encourage à rouvrir, volontairement et à nouveaux frais, une phase extraordinaire à propos de l'interprétation de la mécanique quantique. Dans cette perspective, le premier chapitre du livre est extrêmement précieux. Il propose un tableau détaillé des forces en présence dans les premières décennies du 20<sup>e</sup> siècle. Les divergences ne se réduisent en effet pas à l'opposition entre deux blocs : celui de Copenhague qui se limite à l'interprétation statistique de Born (les phénomènes quantiques n'ont pas besoin d'être expliqués de manière déterministe et causale), et celui d'Einstein prônant un retour au déterminisme classique. Les opposants à l'approche de Copenhague ne forment pas un ensemble homogène. Schrödinger, par

exemple, soutient que la mécanique quantique peut décrire les particules de manière individuelle : les particules doivent être comprises comme des paquets d'ondes formant des ensembles bien localisés spatialement, des « solitons ». Dans un autre registre, de Broglie propose notamment la théorie de l'onde pilote (on parlera plus tardivement de la théorie de de Broglie-Bohm). Dans ce cadre, les points matériels et l'onde continue qui les guide sont reconnus comme des réalités distinctes. Les phénomènes sont déterministes, mais notre ignorance des conditions initiales nous impose parfois de nous limiter à une description statistique.

À travers ce premier chapitre, les auteurs nous suggèrent une réévaluation de la force des éléments qui, historiquement, ont assuré la domination de l'école de Copenhague. Par exemple, ils reviennent sur les faiblesses de l'approche de de Broglie pointées par Heisenberg, Pauli et Einstein (problème de la vitesse nulle de l'électron dans une boîte ou dans l'état fondamental d'un atome), ainsi que sur celles de l'interprétation « soliton » de Schrödinger (ayant, selon Bohr, un domaine de validité trop limité). Les auteurs soutiennent que ces limitations peuvent être dépassées. En outre, ils nous rappellent que le théorème de Von Neumann ou la violation des inégalités de Bell, bien que cruciaux, ne suffisent pas à clairement trancher le débat (le premier ne s'applique qu'aux théories à variables cachées *obéissant aux lois quantiques*, la seconde ne met hors course que les interprétations à variables cachées *locales*). Ainsi, nous sommes invités à prendre de la distance avec le tour historique pris par le débat au sein de la communauté des physiciens. Pour les auteurs, de nombreuses interprétations différentes de la mécanique quantique demeurent éventuellement défendables. En plus des approches déjà mentionnées, on pourrait par exemple parler de la théorie des mondes multiples d'Everett, de celle de la décohérence, des histoires cohérentes de Griffith, ou encore des théories de Ghirardi, Rimini et Weber ou de Penrose qui introduisent un mécanisme générant une réduction objective du paquet d'ondes.

Cette pluralité d'interprétations possibles qui ne peuvent être aisément départagées sur la seule base de la logique ou des mathématiques et des observations empiriques est typique d'une phase extraordinaire kuhnienne. S'il s'avère possible de

compléter le formalisme quantique pour revenir à une description déterministe (sans entrer en conflit avec l'expérience et la cohérence logique), alors le débat déterminisme-indéterminisme est ampliatif. C'est une question externe qui met nécessairement en jeu les engagements philosophiques ou métaphysiques d'arrière-plan des parties en présence. À partir de ce diagnostic, la thèse que les auteurs défendent dans cet ouvrage révèle tout son intérêt. En effet, ils souhaitent montrer qu'il y a des raisons pour résister à une conversion trop rapide au paradigme sous-tendant les positions de l'école de Copenhague, qu'il y a du sens à maintenir ouverte la possibilité du débat à propos de l'interprétation de la mécanique quantique. Dans ce débat, ils entendent défendre leur propre alternative déterministe et réaliste à l'interprétation de Copenhague. Force est de constater que leur proposition est originale. Elle consiste en une interprétation multiple des solutions de l'équation de Schrödinger en fonction des configurations : 1) interprétation de de Broglie-Bohm dans les cas semi-classiques qu'ils nomment « indiscernés », 2) interprétation soliton de Schrödinger dans les cas semi-classiques « discernés », et 3) interprétation statistique de Born dans les cas non semi-classiques (l'équation de Schrödinger ne constitue pas le meilleur formalisme pour étudier les phénomènes correspondants). Cette interprétation multiple découle d'une analyse approfondie de la notion d'indiscernabilité, exposée au chapitre 7.

En effet, l'indiscernabilité est souvent présentée comme un phénomène propre au monde quantique (qui, selon l'interprétation de Copenhague, se passe de la notion de trajectoire). Mais les auteurs nous rappellent que l'on trouve des cas d'indiscernabilité en physique classique (au sein de laquelle la notion de trajectoire est parfaitement légitime), ainsi que des particules discernables dans le domaine quantique. Pour eux, la manière dont on comprend l'indiscernabilité est cruciale. Ils proposent de repartir de l'approche classique du couple discernabilité-indiscernabilité. Prise au sein d'un faisceau de particules, une particule classique sera dite « indiscernée » si on ne connaît à l'instant initial que les caractéristiques du faisceau (densité de probabilité et action initiale). Au contraire, une particule classique sera dite « discernée » si l'on connaît sa position initiale et sa vitesse initiale. Les particules indiscernées sont donc associées à un ensemble de trajectoires décrit par une action globale et une densité de probabilité dont l'évolution est régie par les équations *statistiques* d'Hamilton-Jacobi. Ces équations sont « donc incomplètes pour une particule classique particulière » (p. 193). Dans le cas discerné, les particules sont associées à une trajectoire unique reflétée par une action singulière qui dépend des positions et vitesses initiales. Le tout respecte les équations *singulières* d'Hamilton-Jacobi. Sur la base de cette clarification, la stratégie des auteurs est d'étudier la convergence de la théorie quantique vers l'un ou l'autre de ces deux cas classiques.

Dans un premier mouvement, l'analyse se porte sur les cas semi-classiques, pour lesquels les solutions complexes de

l'équation de Schrödinger peuvent se décomposer en deux composantes réelles, qui sont solutions des équations de Madelung : la densité de probabilité quantique et l'action quantique. Les auteurs indiquent alors que certaines configurations quantiques (semi-classiques) se ramènent au cas classique indiscerné (pp. 190-196). D'après eux, cette continuité légitime une interprétation de type de Broglie-Bohm. Puisque l'on peut interpréter les solutions des équations statistiques de Hamilton-Jacobi comme une description incomplète du comportement d'une particule dans un faisceau (à compléter, au moins conceptuellement, par la donnée de la position initiale), on est en droit de comprendre la fonction d'onde solution de l'équation de Schrödinger comme une description incomplète de la particule, à laquelle il faut, au moins conceptuellement, ajouter la position initiale. On peut alors se représenter des particules quantiques guidées le long des trajectoires de de Broglie-Bohm. Selon Michel Gondran et Alexandre Gondran, cette lecture du cas semi-classique indiscerné à travers le prisme de de Broglie-Bohm est pertinente et légitime dans de nombreux cas d'école de la mécanique quantique (voir les chapitres 2 à 4). Elle s'applique en particulier à tous les cas de jets de particules dans le vide (fentes d'Young, marche de potentiel, particules dans une boîte, expérience des choix retardés de Wheeler) ou dans un champ semi-classique (barrière de potentiel, effet tunnel)<sup>1</sup>.

Cette dernière configuration correspond aussi à la mesure du spin dans les expériences de Stern et Gerlach (chapitre 5). L'originalité par rapport à l'approche de Copenhague est de prendre en compte l'extension spatiale du spineur de Pauli pour décrire des particules réelles dont le spin est progressivement orienté par le champ magnétique. Ce n'est donc pas, dans cette interprétation, l'aimant qui provoque la réduction du paquet d'ondes (on peut notamment recombinaison le faisceau de particules) mais plutôt une obturation éventuelle. Les auteurs soutiennent que l'on peut interpréter dans le même cadre l'expérience EPR-B portant sur les spins des particules (chapitre 6). Bien que les livres usuels de mécanique quantique se limitent à l'état singulet pour représenter les paires de particules intriquées, il est possible de rajouter une dépendance en espace. On peut alors décrire de manière causale l'expérience EPR-B, au moyen de la notion d'influence instantanée à distance : l'orientation par une mesure « Stern-Gerlach » du spin d'une des deux particules pilote l'orientation du spin de l'autre particule par l'intermédiaire de la fonction d'onde singulet. Il y a donc bien non-localité dans l'interprétation de de Broglie-Bohm. Mais cette non-localité ne concerne que des propriétés comme le spin. Il n'est pas absolument nécessaire de la généraliser aux positions ou aux vitesses (contrairement à un « holisme quantique » plus radical ; voir p. 164). Pour les auteurs, rien ne prouve que la non-localité à l'œuvre dans EPR-B se retrouve dans l'expérience de pensée EPR originale (qui porte seulement sur les positions et les vitesses). Le réalisme local d'Einstein pourrait ainsi demeurer valide à propos des positions et des vitesses des particules.

<sup>1</sup> - L'interprétation de de Broglie-Bohm peut devenir encore plus attrayante pour l'interprétation d'expériences mobilisant de « gros » objets quantiques (comme les atomes de Rydberg ou les fullerènes), pour lesquels les notions de propriétés réelles ou de trajectoires réelles semblent indispensables (pp. 81-82). Les auteurs mobilisent même ce type de « gros » objets pour proposer un test qui permettrait de trancher entre la vision de Copenhague (et la complémentarité de Bohr) et celle de Broglie-Bohm (admettant l'existence de l'onde ET du corpuscule) en intercalant des fentes de tailles différentes (supposées laisser passer soit l'onde pilote et les objets guidés, soit seulement l'onde ; voir pp. 98-102).

Pour terminer sur ce cas semi-classique indiscerné, il convient de rappeler que la violation des inégalités de Bell (via l'expérience EPR-B) est susceptible de rentrer en conflit avec la relativité restreinte et la relativité générale d'Einstein. Cela est particulièrement flagrant dans l'interprétation de de Broglie-Bohm qui invoque une action causale instantanée à distance, médiatisée par la fonction d'onde. Ce conflit est d'ailleurs une raison communément invoquée pour rejeter l'approche de de Broglie-Bohm. Les auteurs sont parfaitement conscients de cette difficulté et proposent une piste de solution inattendue dans leur chapitre 10 : (r)ouvrir un débat sur l'interprétation des théories de la relativité. En effet, la relativité einsteinienne qui rejette l'idée d'un référentiel privilégié ne peut admettre la notion d'influences instantanées à distance. Mais les auteurs montrent que d'autres versions (d'autres interprétations du même appareillage mathématique) sont possibles, comme par exemple la relativité de Lorentz-Poincaré (qui postule un référentiel absolu au sein duquel la contraction des longueurs est réelle) ou comme des formulations qui n'identifient pas vitesse limite et vitesse de la lumière dans le vide.

Ainsi, la proposition consistant à comprendre les cas semi-classiques indiscernés à la lumière de la théorie de l'onde pilote de de Broglie-Bohm semble défendable. En complément, les auteurs définissent un cas semi-classique « discerné » qui porte notamment sur les systèmes dont la densité de probabilité quantique est (et reste) bien localisée et ne subit pas de dispersion. Les auteurs utilisent le qualificatif « discerné » en vertu de la convergence des solutions des équations de Madelung « respectivement vers une distribution de Dirac le long de la trajectoire classique et une action  $S(x,t)$ , vérifiant les équations singulières d'Hamilton-Jacobi. » (pp. 196-201). Une particule semi-classique discernée correspondrait donc à une particule classique ponctuelle suivant une trajectoire classique. Il est donc ici souhaitable de considérer que la fonction d'onde solution des équations de Madelung contient toute l'information sur la particule (en accord avec l'interprétation de Copenhague). Néanmoins, la fonction d'onde peut porter sur une particule unique, et c'est donc l'interprétation de Schrödinger qui semble la plus adaptée : la fonction d'onde représente une particule étendue dont le centre de gravité suit la trajectoire classique. D'après les auteurs, cette interprétation s'applique aux états cohérents (par exemple pour des photons d'un faisceau laser), que l'on peut ainsi comprendre comme décrivant des objets quantiques étendus suivant des trajectoires classiques. Il en va de même pour certaines préparations de l'électron dans l'atome d'hydrogène (concrétisation du « rêve » de Schrödinger).

Reste donc la question des configurations quantiques qui échappent à l'approximation semi-classique. C'est notamment le cas lorsque le potentiel ne peut être traité de manière classique, comme lors de transitions entre les états propres d'un atome. Dans ce type de cas, l'équation de Schrödinger ne peut plus se comprendre à travers les prismes de de Broglie-Bohm ou de Schrödinger. Les auteurs soutiennent que l'on doit s'en tenir à l'interprétation statistique de Born. Mais cela ne les conduit pas pour autant à renoncer au réalisme et au déterminisme. Pour eux, l'équation de Schrödinger permet

de prédire les résultats statistiques d'expériences non semi-classiques impliquant un grand nombre de particules, mais est inadéquate et incomplète pour prendre en compte le comportement individuel des particules. Il reste néanmoins possible d'espérer que des développements théoriques futurs – les auteurs mentionnent les travaux de Muynck sur la théorie quantique des champs généralisée – permettront d'étendre la validité de leur interprétation multiple.

En conclusion, un des mérites principaux de l'ouvrage de Michel Gondran et Alexandre Gondran est de nous suggérer qu'il y a encore matière à discussion à propos de l'interprétation de la mécanique quantique. Les auteurs nous rappellent le « coup de gueule » de John Bell qui pointe implicitement le rôle des arrière-plans philosophiques : « le flou, la subjectivité et l'indéterminisme ne nous sont pas imposés de force par les faits expérimentaux, mais proviennent d'un choix théorique délibéré » (p. 304). Leur ouvrage met clairement en évidence que les tenants de l'école de Copenhague s'appuient sur un positivisme instrumentaliste ou vérificationniste selon lequel ne sont bienvenues que les hypothèses possédant des conséquences observables. De ce point de vue, l'approche de Copenhague se révèle très performante. Si l'on adhère à ce type d'arrière-plan, admettre l'indéterminisme sur la base du formalisme quantique est raisonnable. Pour autant, l'admission de l'indéterminisme n'a rien d'inévitable. L'enracinement dans un autre arrière-plan philosophique peut conduire à d'autres conclusions. Einstein n'a jamais abandonné sa volonté de préserver le déterminisme. Il comparait le positivisme instrumentaliste de l'école de Copenhague à « un oreiller douillet » difficile à quitter (p. 44). À sa suite, les auteurs accordent une grande importance à une certaine continuité avec la tradition classique et à la défense du réalisme et du déterminisme. Leur double interprétation satisfait à ces impératifs méthodologiques. Ils suggèrent aussi que leur approche est attractive en vertu de son pouvoir unificateur puisque les frontières entre les mondes classique, quantique et relativiste s'évanouissent : « les propriétés [des particules] considérées comme spécifiquement quantiques ou classiques dépendent des ordres de grandeur liés aux conditions expérimentales » (p. 298).

Ce type d'analyse comparée semble indispensable si l'on doit, comme espèrent nous en convaincre les auteurs, faire revivre le débat sur l'interprétation de la physique quantique. Alors certes, rouvrir une telle controverse nous replace en quelque sorte dans une phase que Kuhn qualifierait de science extraordinaire. Mais est-ce nécessairement un problème ? Ré-autoriser la coexistence de « paradigmes » différents n'équivaut pas directement à un basculement dans le relativisme, dans une situation épistémique de laquelle toute rationalité serait absente. Il est vrai que la coexistence de paradigmes (méthodologiquement) « incommensurables » interdit toute prise de décision purement algorithmique sur la base d'un ensemble de critères de rationalité explicites et partagés (Oberheim et Hoyningen-Huene 2013). Mais à moins de réduire toute rationalité à une telle forme algorithmique, rien n'interdit de maintenir ouvert un débat rationnel (Putnam 1981, en particulier le chapitre 5). Au contraire, la préservation d'un tel débat devient cruciale. Il convient, dans de telles configu-

rations extraordinaires, d'expliciter les arrière-plans épistémiques de chacun et de tenter de discuter rationnellement de la légitimité des éléments divergents de ces paradigmes. Les auteurs ne revendiquent d'ailleurs rien de plus qu'un espace pour se poser collectivement ces questions. Leur ouvrage fait ainsi œuvre de ce qu'on pourrait nommer « salubrité épistémique » en tentant de permettre au lecteur de s'interroger de manière éclairée et informée : « Et si Einstein et de Broglie avaient aussi raison ? ».

#### RÉFÉRENCES

OBERHEIM, Eric, HOYNINGEN-HUENE, Paul. 2013. The Incommensurability of Scientific Theories. *The Stanford Encyclopedia of Philosophy*, edited by Edward N. Zalta.

[Lien](#)

PUTNAM, Hilary. 1981. *Reason, Truth and History*. Cambridge : Cambridge University Press. [Lien](#)

#### HISTORIQUE

Compte rendu soumis le 6 décembre 2017.  
 Compte rendu accepté le 6 décembre 2017.

#### SITE WEB DE LA REVUE

[sites.uclouvain.be/latosensu/index.php/latosensu/index](http://sites.uclouvain.be/latosensu/index.php/latosensu/index)

ISSN 2295-8029

DOI <http://dx.doi.org/10.20416/LSRSPS.V5I2.4>

#### CONTACT ET COORDONNÉES :

Mathieu Guillermin  
 Université catholique de Lyon

[mguillermin@univ-catholyon.fr](mailto:mguillermin@univ-catholyon.fr)



SOCIÉTÉ DE PHILOSOPHIE DES SCIENCES (SPS)

École normale supérieure  
 45, rue d'Ulm  
 75005 Paris  
[www.sps-philoscience.org](http://www.sps-philoscience.org)

