

Mécanique Quantique : Deux Interprétations ?

par Alexandre et Michel Gondran

article publié dans la revue **Découverte** de janvier-février 2016, n°402 (Palais de la Découverte)

Résumé

L'interprétation actuelle de la mécanique quantique est née au congrès Solvay de 1927 où le point de vue de Niels Bohr, Werner Heisenberg, Max Born et Wolfgang Pauli s'est imposé contre celui de Max Planck, Albert Einstein, Louis de Broglie et Erwin Schrödinger : il fallait renoncer désormais au déterminisme et à l'existence d'une réalité objective. Les conséquences philosophiques et épistémologiques de cette interprétation sont immenses... et les difficultés de compréhension aussi !

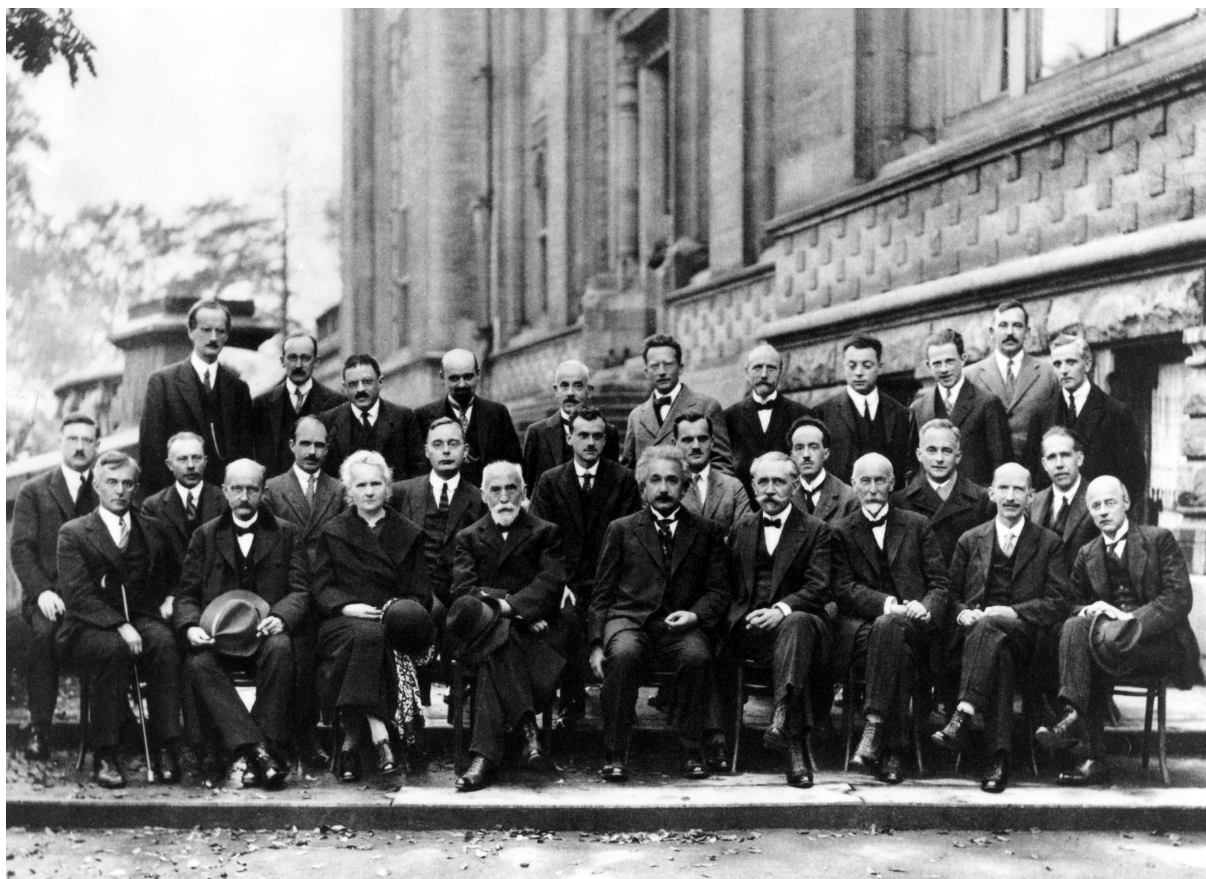


FIGURE 1 – Participants au Congrès Solvay de 1927. Premier rang : Irving Langmuir, Max Planck, Marie Curie, Hendrik Antoon Lorentz, Albert Einstein, Paul Langevin, Charles Eugène Guye, Charles Thomson Rees Wilson, Owen Willans Richardson ; Second rang : Peter Debye, Martin Knudsen, William Lawrence Bragg, Hendrik Anthony Kramers, Paul Dirac, Arthur Compton, Louis de Broglie, Max Born, Niels Bohr ; Troisième rang : Auguste Piccard, Émile Henriot, Paul Ehrenfest, Édouard Herzen, Théophile de Donder, Erwin Schrödinger, Jules-Émile Verschaffelt, Wolfgang Pauli , Werner Heisenberg, Ralph H. Fowler, Léon Brillouin. Photographie de Benjamin Couprie pour le compte de l'Institut international de physique Solvay, Parc Léopold, Bruxelles, Belgique.

C'est en 1924 que Louis de Broglie (1892-1987) montre que toute particule possède un caractère ondulatoire : c'est la dualité onde-corpuscule, une prédiction qui se révèle juste et dont la portée philosophique est considérable. Pour de Broglie, cette dualité s'exprime par le fait que toute particule est accompagnée d'une onde. Cependant, l'année suivante, Werner Heisenberg (1901-1976) met sur pied la mécanique dite matricielle. Dans cette théorie, il n'y a a priori ni onde, ni particule. Pour de Broglie et Albert Einstein (1879-1955), la physique était en train de s'engager dans une mauvaise voie : elle n'a plus comme ambition de décrire la réalité mais uniquement de prévoir des événements. La théorie de Heisenberg reçoit en revanche le soutien de Niels Bohr (1885-1962), Max Born (1882-1970), Wolfgang Pauli (1900-1958) et de la majorité des physiciens pour qui la particule ne se trouve nulle part tant qu'elle n'a pas été observée. De Broglie et Einstein sont persuadés quant à eux qu'elle existe et se trouve à chaque instant quelque part, son onde étant partout à la fois, étendue.

Cet article propose de remonter aux sources de ce débat, c'est-à-dire à l'interprétation de la fonction d'onde : cet objet mathématique abstrait qui permet de décrire les particules quantiques - photon, électron, atome, molécule... À travers l'expérience fondamentale des fentes de Young, nous présentons la théorie de l'onde pilote de de Broglie-Bohm (appelée Bohmien Mechanics dans le monde anglo-saxon) qui, en accord avec tous les résultats expérimentaux, réhabilite le réalisme¹ et le déterminisme².

Les deux pères de la dualité onde-particule

FONCTION D'ONDE ET THÉORIE QUANTIQUE

À la fin du XIX^e siècle, la physique est construite sur deux concepts. D'un côté, il y a les particules, corpuscules de matière dont le mouvement est décrit par la mécanique newtonienne. De l'autre, il y a les ondes, parmi lesquelles la lumière, qui possèdent des propriétés typiques : elles diffractent et interfèrent. C'est en 1900 que Max Planck (1858-1947), pour comprendre le rayonnement des corps chauffés, émet l'hypothèse que les échanges d'énergie entre matière et lumière ne s'effectuent pas de façon continue mais via des quantités discrètes (quanta d'énergie). En 1905, Einstein élabore cette notion de quanta d'énergie pour définir la lumière et introduit ce qui fut appelé par la suite le photon : un grain insécable de lumière. Pendant les vingt années suivantes, le développement de la théorie quantique fut riche non seulement d'hypothèses hardies et d'intuitions géniales, mais aussi d'âpres controverses. Après les modèles ad hoc de l'atome d'hydrogène de Bohr en 1913, c'est à de Broglie que revint le mérite "*de lever un coin de la grand-voile*" (selon les dires d'Einstein) en 1923, en émettant l'hypothèse qu'à toute particule de matière de masse m pouvait correspondre une onde de longueur d'onde $\lambda = h/mv$, v étant la vitesse et h la constante de Planck. La séparation onde-particule du XIX^e siècle vole définitivement en éclat. Le nouvel outil mathématique que de Broglie introduit pour décrire un objet quantique (électron, atome, molécule...) porte le nom de fonction d'onde. Cependant, cette dernière reste une notion mathématique abstraite et sa signification réelle n'est pas définie clairement ; elle explique correctement le comportement ondulatoire des objets quantiques mais la notion classique de position n'est plus définie directement. En effet, à partir de cette fonction d'onde, Born montre en 1926 que seule la probabilité de la position de la particule peut être déterminée, sa position exacte demeurant inconnue. La théorie naissante ne prévoit que des probabilités ! C'est une révolution conceptuelle majeure.

Les équations de la théorie permettant de calculer l'évolution dans le temps de cette fonction d'onde (et donc des probabilités) furent inventées de manière indépendante par Heisenberg en 1925 et Erwin Schrödinger (1887-1961) en 1926, puis par Paul Dirac (1902-1984) en 1928 dans sa version plus complète où l'on tient compte de la relativité einsteinienne. Pauli, Pascual Jordan (1902-1980), puis Richard Feynman (1918-1988) et bien d'autres en feront la belle théorie conceptuelle connue aujourd'hui sous le nom de mécanique quantique.

1. **Réalisme** : il consiste à admettre qu'il existe une réalité objective, c'est-à-dire indépendante de l'observateur. Il est nécessaire de préciser la nature de ce réel sous-jacent à notre perception.

2. **Déterminisme** : un événement est déterministe s'il s'explique grâce à d'autres événements par une suite de causes et d'effets ; il n'existe pas d'événement fondamentalement aléatoire, c'est-à-dire sans cause. L'aléa s'explique par l'ignorance des conditions initiales de l'expérience ou de l'incomplétude du modèle s'il est trop complexe ; par exemple la météo, le billard, le loto ou le lancer de dés.

Bien que la théorie quantique ne prévoie que des probabilités, elle va remporter un succès considérable. En effet, elle permet d'expliquer et d'anticiper les mesures effectuées sur le monde physique qui nous entoure avec une très grande précision, depuis la structure de l'atome jusqu'à la conduction électronique des solides.

Cette théorie quantique constitue aujourd'hui un cadre essentiel à notre prévisibilité de la Nature, de l'infiniment petit à l'infiniment grand. De nombreuses applications en découlent : lasers, horloges atomiques, GPS (Global Positioning System, le géopositionnement par satellite), ordinateurs, IRM (imagerie par résonance magnétique)...

"Einstein, de Broglie et Schrödinger n'ont cessé d'insister sur ce que l'interprétation statistique de la mécanique quantique avait de peu satisfaisant, de réclamer un retour aux conceptions de la physique classique newtonienne et de proposer des moyens d'y arriver sans contredire aux faits expérimentaux." Discours de Max Born, colauréat du prix Nobel de physique, 1954.

L'EXPÉRIENCE DES FENTES DE YOUNG

Mais c'est l'interprétation de la fonction d'onde de la mécanique quantique qui déclenche le plus grand débat scientifique du XXe siècle. La fonction d'onde représente-t-elle complètement l'objet quantique comme l'assure l'interprétation statistique de Copenhague (se reporter au chapitre suivant) ? Dans ce cas, les probabilités sont fondamentales à la nature physique. Ou alors faut-il ajouter à la fonction d'onde la position de la particule pour représenter l'objet quantique, comme le veut l'interprétation déterministe de de Broglie-Bohm ? Dans ce cas, les probabilités proviennent d'un modèle sous-jacent de la réalité.

L'expérience des fentes de Young a été réalisée initialement par Thomas Young (1773-1829) en 1804 et a démontré l'aspect ondulatoire de la lumière ; plus de cent ans plus tard, elle s'avère cruciale dans le débat sur l'interprétation du dualisme onde-particule. En effet, c'est une expérience simple qui présente les deux caractéristiques des phénomènes quantiques : les caractères ondulatoire au niveau macroscopique et corpusculaire au niveau microscopique. *"[Cette expérience aborde] le point fondamental du comportement mystérieux [des objets quantiques (photon, électron, atome, molécule...)] sous son aspect le plus étrange. C'est un phénomène qu'il est impossible, absolument impossible à expliquer de façon classique et qui contient le cœur de la mécanique quantique. En réalité, il en contient l'unique mystère."* (Richard Feynman).

La figure 2 présente le schéma de l'expérience des fentes de Young réalisée par Claus Jönsson. Un canon émet des électrons dans le plan horizontal, à travers un trou de quelques millimètres. Ceux-là rencontrent une plaque percée de deux fentes horizontales. Un écran situé après ces fentes récolte les électrons un à un (aspect corpusculaire). L'impact de chaque électron apparaît sur l'écran au fur et à mesure que l'expérience se déroule. Au bout de quelques milliers d'impacts d'électrons, leur répartition sur l'écran fait apparaître des franges d'interférence (alternance de zones où les impacts sont nombreux et de zones où il n'y en a aucun, caractéristique de l'aspect ondulatoire). Le caractère ondulatoire d'un électron ne se révèle que statistiquement.

Interprétation de Copenhague

Dans l'interprétation de Copenhague, qui est l'interprétation orthodoxe de la mécanique quantique, toujours en vigueur, l'électron est soit une onde soit un corpuscule, mais en aucun cas les deux à la fois. C'est le principe de complémentarité de Bohr pour lequel l'électron présente soit les propriétés d'une onde, soit celles

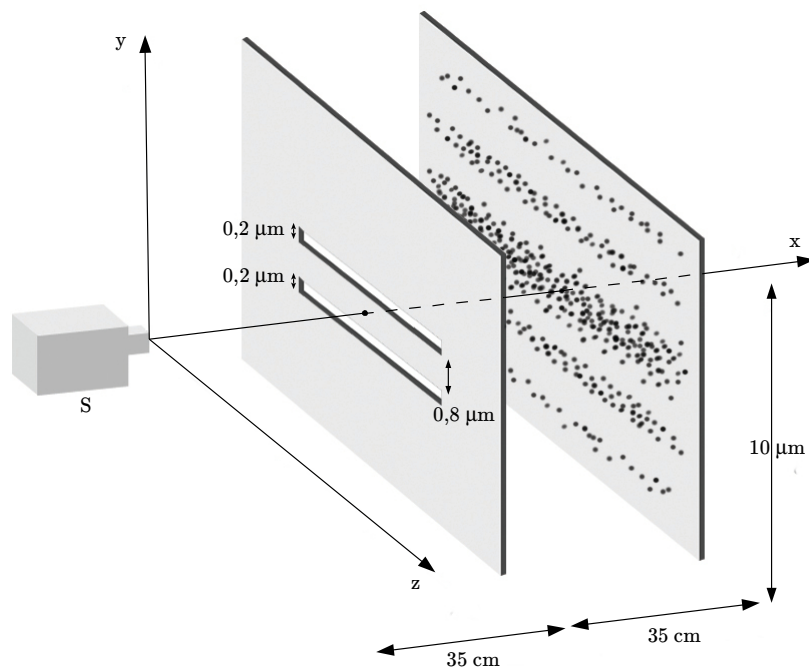


FIGURE 2 – Schéma de l'expérience de Young réalisée par claus Jönsson avec des électrons.

d'un corpuscule. Durant toute l'expérience, l'électron est seulement une onde qui traverse les deux fentes à la fois (Fig. 3) ; il ne manifeste sa propriété corpusculaire qu'au moment de l'impact sur l'écran, phénomène appelé postulat de réduction du paquet d'onde. L'équation de Schrödinger ne prévoit qu'une probabilité du lieu de l'impact, égale au carré de l'amplitude de l'onde. Sa position effective dans l'interprétation de Copenhague est sans explication : c'est un aléa fondamental. Einstein critiqua cette vision des choses par sa célèbre formule : *"Dieu ne joue pas aux dés"*. D'après lui, les prédictions aléatoires de la mécanique quantique ne provenaient pas d'un aléa « vrai » ou fondamental de la physique, mais d'une incomplétude du modèle : il devait exister un modèle sous-jacent qui explique ces aléas.

Un autre problème déroutant de cette interprétation est qu'elle présente deux possibilités d'évolution de la fonction d'onde : soit grâce à l'équation de Schrödinger (dans la plupart des cas), soit grâce à la réduction du paquet d'onde (dès qu'une mesure est effectuée), la théorie ne préconisant rien sur le choix à faire. Qu'est-ce qui différencie une interaction « normale » (équation de Schrödinger) d'une interaction relevant de la mesure (réduction du paquet d'onde) ? La théorie de la décohérence³ ne règle en aucun cas ce problème. Elle s'intéresse seulement à l'enchaînement des interactions successives avec l'appareil de mesure, ce qui aboutit à l'intrication⁴ d'une particule quantique individuelle avec un élément macroscopique. Cette intrication correspond à la célèbre critique de Schrödinger connue sous le nom de chat de Schrödinger (encadré).

3. **Décohérence** : phénomène étudié initialement par David Bohm (1917-1992) en 1952 qui s'intéresse à l'enchaînement des interactions d'un objet quantique avec les objets quantiques de son environnement. Ces interactions successives intriquent les objets quantiques de l'environnement avec l'objet quantique initial et rendent le système global très instable car une « mesure » de l'un des objets de l'environnement a des effets sur tous les autres objets quantiques dont l'objet initial. Si ce dernier est dans un état superposé, tous les objets de l'environnement deviennent à leur tour des états superposés : c'est le cas du chat de Schrödinger. La décohérence est la perte de cette superposition.

4. **Intrication** : après que deux particules ont interagi ensemble, il se peut qu'il ne soit plus possible d'expliquer le comportement de l'une sans connaître le comportement de l'autre. Elles forment un tout, on dit qu'elles sont intriquées.

Il s'agit d'une expérience de pensée proposée par Erwin Schrödinger en 1935 pour mettre en lumière le problème d'inconsistance de la mesure dans l'interprétation de Copenhague. Un chat est enfermé dans une boîte contenant un dispositif qui le tue dès qu'un atome radioactif se désintègre (en cassant une fiole qui libère un poison mortel). Avant de se désintégrer, l'atome est dans une superposition des états désintégré et intact.

Selon l'interprétation de Copenhague, l'atome se trouve simultanément dans deux états ; cette interprétation de la superposition d'états ne considère pas l'état de l'atome comme un véritable état intermédiaire (comme le violet est entre le rouge et le bleu) mais comme un état indéterminé. Le problème survient car dans le monde classique (macroscopique), ces états indéterminés n'existent pas ou du moins n'ont jamais été observés. Les lois de la mécanique quantique (équation de Schrödinger) prévoient pourtant que la superposition d'états de l'atome se propage de proche en proche aux autres objets quantiques, qui se trouvent à leur tour dans une superposition d'états. Ces superpositions se propagent alors à des objets de plus en plus gros, jusqu'à la fiole contenant le poison, à la fois dans les états « cassé » et « intact », et finalement au chat à la fois mort et vivant.

Il est possible de sortir de ce dilemme de deux manières. La première en ajoutant un postulat supplémentaire à la mécanique quantique, celui de la réduction du paquet d'onde énoncé dans l'interprétation de Copenhague. Cette nouvelle loi d'évolution du système quantique suppose que lorsqu'une « mesure » est effectuée par un « observateur », l'indétermination du système se lève : le système se met spontanément et instantanément dans l'un des deux états de façon aléatoire (aléa fondamental). Dans le cas du chat, c'est l'ouverture de la boîte qui le contraint à se mettre soit dans l'état « mort » soit dans l'état « vivant ». Reste une question non résolue : quand utiliser le postulat de réduction du paquet d'onde ? Et l'équation de Schrödinger ? En effet, ce sont deux façons différentes de faire évoluer le système. En d'autres termes, qu'est-ce qui différencie une « mesure » d'une interaction classique ?

L'autre possibilité pour sortir du dilemme est de remettre en question l'interprétation de la superposition d'états ; ce que fait l'interprétation de de Broglie-Bohm en complétant la description du système quantique. L'état de superposition est un état réel, intermédiaire entre les deux états et il existe une variable supplémentaire (la position de la particule) qui lève l'indétermination. Comme dans le jeu de pile ou face, la pièce de monnaie qui virevolte dans l'air est dans une superposition de l'état pile et de l'état face avant d'être mesurée, mais seuls les états pile et face sont observables.

Une critique approfondie de cette non-consistance de l'interprétation de Copenhague peut se trouver dans les excellents livres de Franck Laloë [3] et Jean Bricmont [1]. Ces problèmes expliquent largement la difficulté de compréhension de la mécanique quantique. L'interprétation de Copenhague nie même l'existence de la réalité avant la mesure par un observateur. Einstein cristallise sa critique par la formule : *"j'aime à penser que la Lune est là, même quand je ne la regarde pas"*.

Interprétation de de Broglie-Bohm

UNE THÉORIE SOLIDE...

Dans l'interprétation de de Broglie-Bohm, l'électron est à la fois une onde et un corpuscule. Onde et corpuscule coexistent, la première guidant le second, d'où le nom d'onde pilote donné par de Broglie en 1927. L'électron est donc décrit par la fonction d'onde et par la position de son centre de gravité. Il correspond à une réalité augmentée par rapport à la mécanique classique : il n'y a pas d'aléa fondamental, c'est la position initiale de l'électron (au sortir du canon) qui détermine son impact sur l'écran et, dans ce cas, *"Dieu ne joue pas aux dés"*. Comme dans le chaos déterministe, de petites variations dans les conditions initiales (positions différentes des électrons au sortir du canon) engendrent de grandes variations au final (impacts sur l'écran) (Fig. 4). Cependant, du fait que la position initiale de l'électron n'est connue que statistiquement, la position

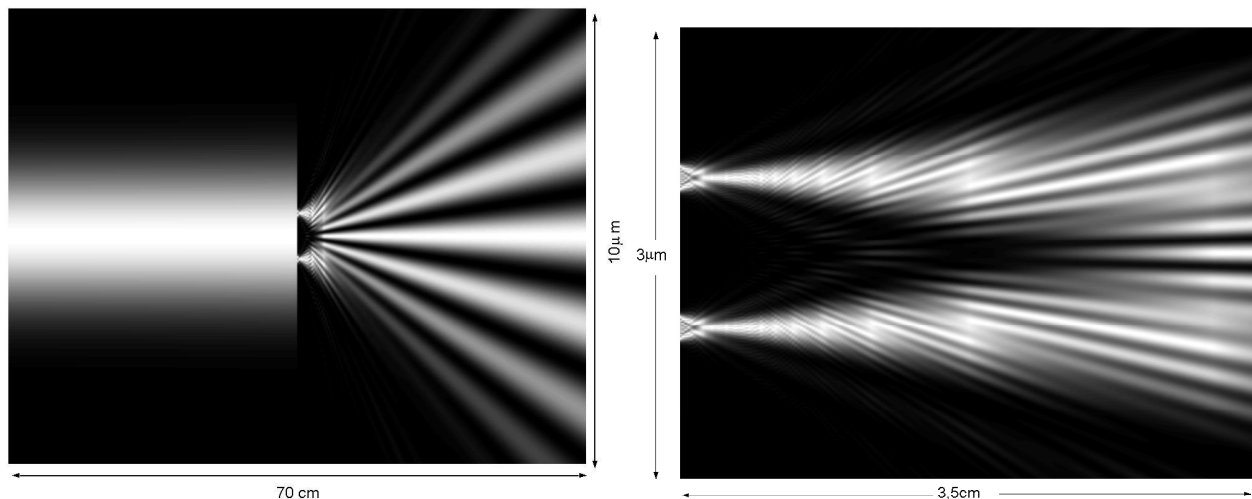


FIGURE 3 –

Figure de gauche : Densité de probabilité de présence d'un électron à différentes distances des fentes. Elle est commune aux interprétations de Copenhague et de de Broglie-Bohm.

Figure de droite : zoom sur la densité de la précédente figure : probabilité de présence d'un électron à différentes distances des fentes. elle est commune aux deux interprétations

finale ne peut, elle aussi, être connue en pratique que statistiquement. Comme l'a formulé Bernard d'Espagnat [2], la « réalité est voilée », c'est-à-dire qu'elle ne nous est pas directement accessible : à la sortie du canon à électrons, il nous est impossible de connaître la position exacte de chaque électron.

"En 1952, j'ai vu l'impossible se réaliser. David Bohm montrait explicitement comment des paramètres pouvaient effectivement être introduits, dans la mécanique ondulatoire non relativiste, grâce auxquels la description indéterministe pouvait être transformée en une description déterministe." John Bell.

Dans cette théorie de de Broglie-Bohm, la notion de trajectoire pour le centre de gravité de l'électron est rétablie, sa vitesse se déduisant directement de sa fonction d'onde. Contrairement à l'interprétation de Copenhague, il n'y a pas de frontière entre les mondes classique et quantique, le passage de l'un à l'autre se fait continûment. Comme le montre la figure 5, les trajectoires quantiques convergent vers les trajectoires classiques lorsque, dans les simulations, on fait tendre la constante de Planck h vers 0.

En outre, cette théorie prédit les mêmes résultats que la mécanique quantique habituelle dont elle partage les équations. Elle complète le modèle et rétablit déterminisme et réalisme en mécanique quantique. Aucune expérience actuelle n'est venue invalider cette théorie ; au contraire, toutes les expériences l'ont confirmée, en particulier celles de non-localité d'Aspect (expérience EPR, Einstein-Podolsky-Rosen) et la cryptographie quantique. Les expériences réalisées en 1981 et 1982 par l'équipe d'Alain Aspect ont montré de façon certaine que si deux particules ayant interagi ensemble d'une certaine manière (on dit qu'elles sont intriquées), alors il n'est plus possible d'expliquer le comportement de l'une sans connaître celui de l'autre. Et même si les particules sont très éloignées, l'interaction de l'une sur l'autre est instantanée (ou du moins supraluminale) et ne décroît pas avec la distance. On parle de façon équivalente soit de non-localité, c'est-à-dire que les

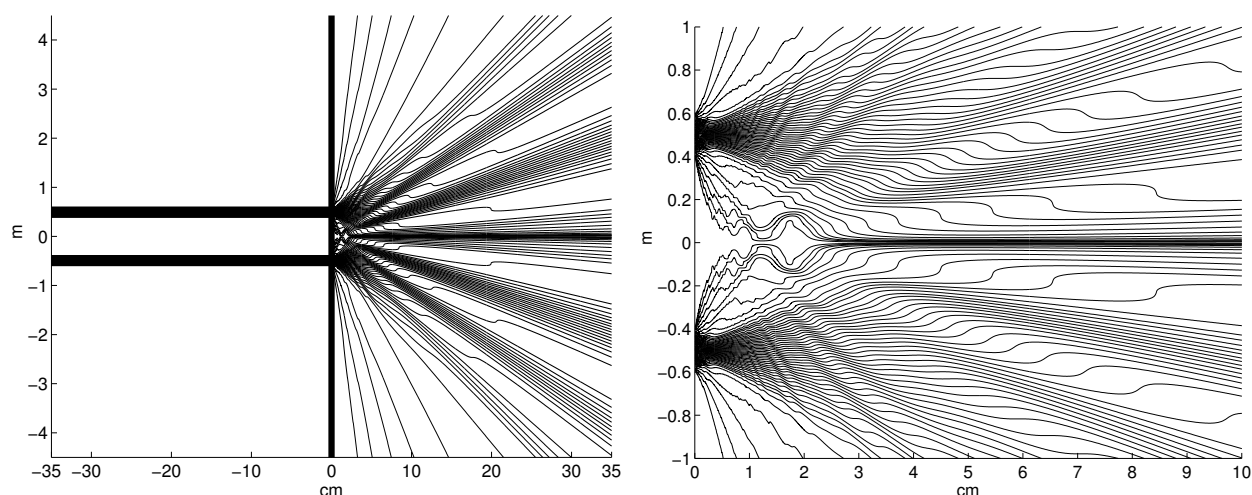


FIGURE 4 –

Figure de gauche : simulation de trajectoires possibles pour l'expérience des fentes de Young. Les positions initiales des électrons à la sortie du canon sont tirées aléatoirement.

Figure de droite : zoom des trajectoires.

deux particules forment un tout même si elles sont très éloignées l'une de l'autre, soit d'interaction à distance instantanée. À noter que cette interaction a été observée uniquement sur les spins des particules et non sur leurs positions ou leurs vitesses. Ce comportement surprenant de la physique quantique a été signalé dès 1935 dans une expérience de pensée imaginée par Einstein, Boris Podolsky (1896-1966) et Nathan Rosen (1909-1995) - c'est pourquoi on parle d'expérience EPR. Bien que la théorie de de Broglie-Bohm ait été développée en 1927, elle prévoit cette interaction non locale.

La cryptographie quantique est une application récente de la mécanique quantique (1984), qui permet de transmettre des messages en étant certain que personne n'a écouté le message entre son émission et sa réception. Elle utilise la superposition d'états du spin d'un photon et le fait que le spin est une propriété à valeur non préexistante, c'est-à-dire que toute mesure du spin transforme la valeur qu'elle avait avant la mesure. Certaines versions de la cryptographie quantique utilisent également l'intrication quantique.

... MAIS DÉLAISSÉE

Pourtant, cette interprétation reste méconnue des physiciens et ignorée du grand public. En 1987, John Bell (1928-1990) évoque son incompréhension quant aux difficultés de cette théorie à être reconnue : *"Mais alors pourquoi Born ne m'avait-il pas parlé de cette « onde pilote » ? Ne serait-ce que pour signaler ce qui n'allait pas avec elle ? Pourquoi Von Neumann ne l'a-t-il pas envisagée ? Plus extraordinaire encore, pourquoi des gens ont-ils continué à produire des preuves d'impossibilité, après 1952, et aussi récemment qu'en 1978 ? Alors que même Pauli, Rosenfeld et Heisenberg ne pouvaient guère produire de critique plus dévastatrice de la théorie de Bohm que de la dénoncer comme étant « métaphysique » et « idéologique » ? Pourquoi l'image de l'onde pilote est-elle ignorée dans les cours ? Ne devrait-elle pas être enseignée, non pas comme l'unique solution, mais comme un antidote à l'autosatisfaction dominante ? Pour montrer que 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 ?"*

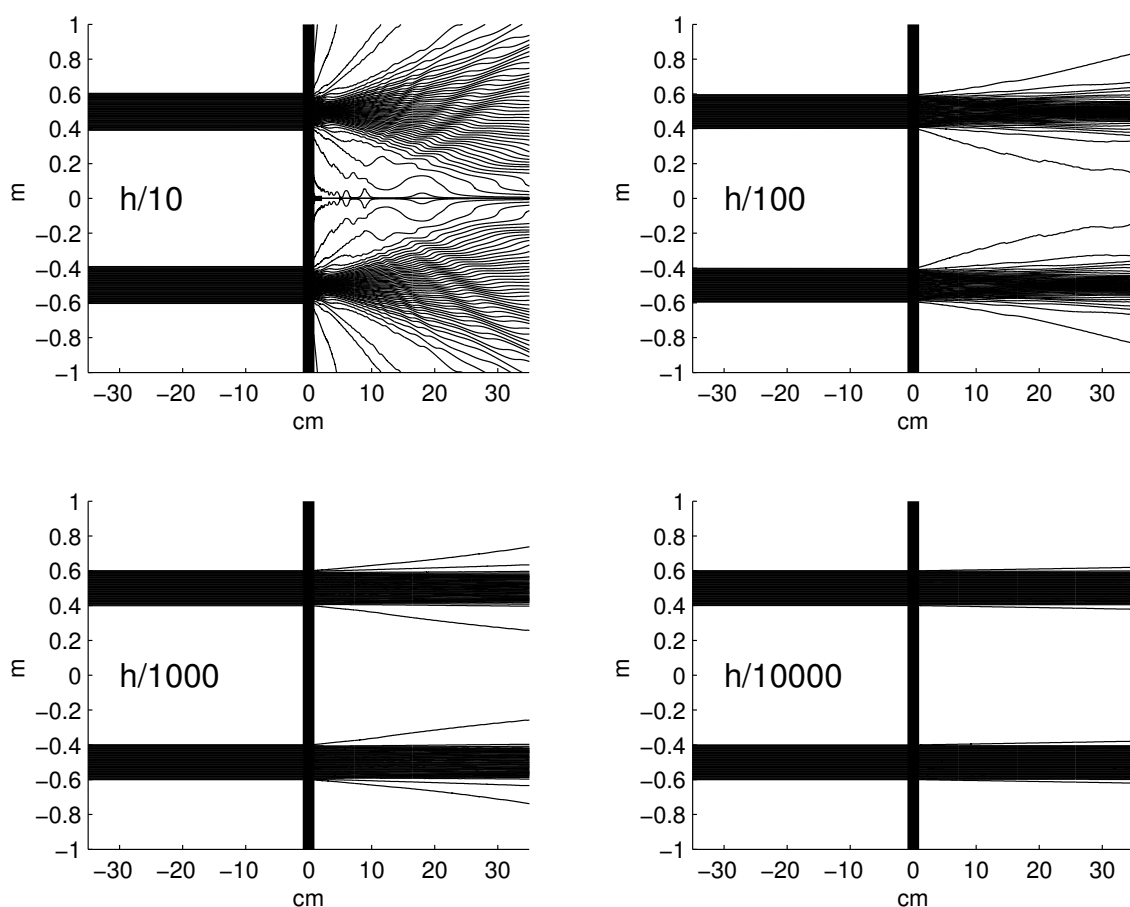


FIGURE 5 – Convergence des trajectoires quantiques vers les trajectoires classiques lorsque, dans les simulations, on fait tendre la constante de Planck h vers 0.

les auteurs

Après des études d'ingénieur (Télécom Paris, 2001) et un doctorat en informatique (Université Technologique de Belfort-Montbéliard, 2008), **Alexandre Gondran** est actuellement enseignant-chercheur à l'École Nationale d'Aviation Civile à Toulouse. Il a travaillé également au département de physique du Palais de la Découverte et enseigné en secondaire la physique-chimie.

Michel Gondran a fait toute sa carrière à EDF R&D en tant qu'ingénieur-chercheur et conseiller scientifique. Ses recherches pluridisciplinaires l'ont amené à enseigner dans de nombreuses écoles et à l'Université (École Polytechnique, ENSAE, Ponts et Chaussées, ENSTA, Université Paris-Dauphine). Il est membre de l'Académie Européenne Interdisciplinaire des Sciences (président 2005-2010). Il est lauréat de l'Académie des Sciences et de l'Académie des Inscriptions et Belles-Lettres.

Pour en savoir plus

Gondran M., Gondran A., *Mécanique quantique : et si Einstein et de Broglie avaient aussi raison ?*, Éditions matériologiques, 2014.

Voir aussi <http://thequantumphysics.wordpress.com>.

Références

- [1] Bricmont J., *Contre la philosophie de la mécanique quantique*, in franck R. (éd.), Les sciences et la philosophie - Quatorze essais de rapprochement, Vrin, 1995. Bricmont J., Zwiirn H., *Philosophie de la mécanique quantique*, Vuibert, 2009. en ligne : <http://users.skynet.be/radoux/textes/quantique.pdf>.
- [2] D'Espagnat B., *Le réel voilé - Analyse des concepts quantiques*, fayard, 1994 ; *Une incertaine réalité - Le monde quantique, la connaissance et la durée*, fayard, 1993 ; *À la recherche du réel - Le regard d'un physicien*, pocket, 1991.
- [3] Laloë F., *Comprenons-nous vraiment la mécanique quantique ?*, EDP sciences, 2011. Lire aussi <http://www.phys.ens.fr/cours/notes-de-cours/fl-mq/mq.PDF>.