

Mécanique quantique

“There was a time when the newspapers said that only twelve men understood the theory of relativity. I do not believe there ever was such a time. There might have been a time when only one man did, because he was the only guy who caught on, before he wrote his paper. But after people read the paper a lot of people understood the theory of relativity in some way or other, certainly more than twelve. On the other hand, I think I can safely say that nobody understands quantum mechanics”

Richard Feynman¹

Mécanique quantique : Mécanique tenant compte de la structure corpusculaire et basée sur la théorie des quanta [Office de la langue française, 1990].

Puisque cette théorie décrit un comportement non-intuitif des particules et que l'expérimentation suivant les modèles quantiques permet de faire des découvertes toujours plus fascinantes, la mécanique quantique est l'un des espoirs souvent soulevé en ce qui concerne les voyages intersidéraux. Voyons ce qu'il en est.

Historique

Le développement des bases de la mécanique quantique s'est effectué en majorité au cours des années 20-30. Elle est venue pallier à certaines erreurs qu'engendrait le modèle de la mécanique classique, surtout à des échelles très petites (de l'ordre de la grandeur d'un atome).

Contrairement à la mécanique classique, à la relativité ou à l'électromagnétisme, le développement de la théorie de la mécanique quantique n'a pas été fait principalement par un seul homme. Elle est le fruit des travaux de maints scientifiques de renom tels que Bohr, Dirac, Einstein, Heisenberg, Pauli, Planck, Schrödinger, De Broglie, etc.

Nous pouvons mentionner deux points faisant partis des différences majeures entre la mécanique classique et quantique.

Tout d'abord, la mécanique classique ne limite pas les niveaux d'énergie que l'on peut mesurer dans un système physique quelconque tandis que la mécanique quantique affirme qu'un système physique ne peut avoir que certains niveaux d'énergie (l'énergie est « quantifiée »).

Ensuite, il y a une différence fondamentale entre la prise de mesure sur un système évalué par la mécanique classique et quantique. Au niveau de la mécanique classique, la modification du système faite par l'application de l'instrument de mesure est négligeable. Au contraire, les systèmes évalués par la mécanique quantique sont grandement influencés par la prise de mesure. Autrement dit, la mécanique quantique nous dit que lorsque l'on prend une mesure quelconque sur le système (vitesse, masse, etc.), on modifie celui-ci. La mesure ne pourra donc pas avoir plus qu'une certaine précision donnée et ce, même si l'on utilise un instrument parfait².

La mécanique quantique utilise ce que l'on appelle « la fonction d'onde » (notée « Ψ ») pour décrire un système quelconque. Appliquée, par exemple, à l'électron de l'atome d'hydrogène,

cette fonction d'onde pourra nous donner, entre autre, la probabilité de trouver l'électron à une certaine distance du noyau de l'atome.

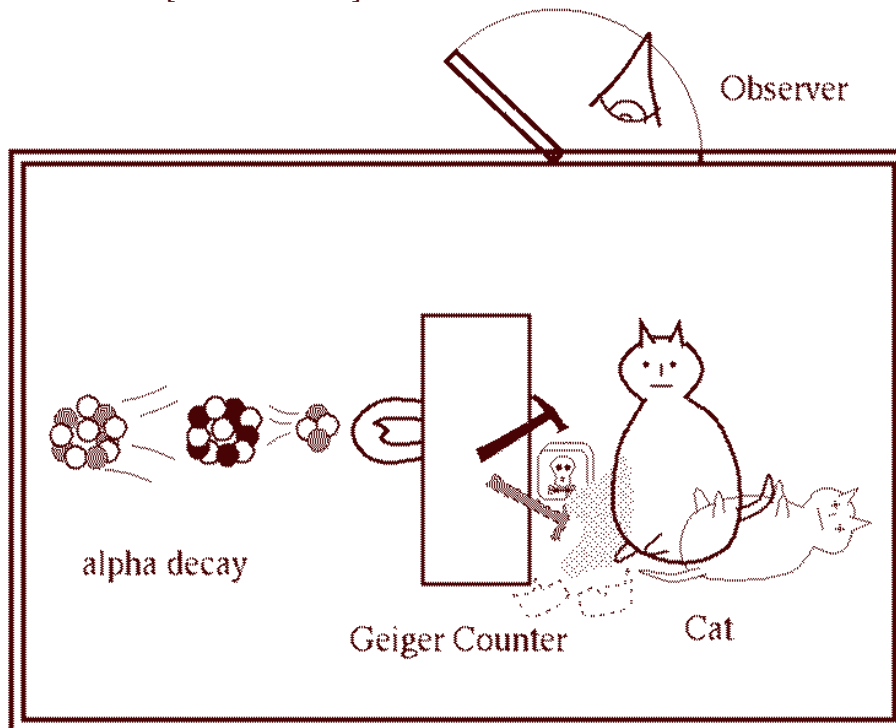
Puisque la mécanique quantique est une théorie statistique, certains y voit une théorie incomplète car, selon eux, une théorie physique se doit d'arriver à une réponse précise qui sera, par la suite, confirmée/infirmée par une mesure expérimentale ayant un certain intervalle d'incertitude, intervalle qui peut normalement être réduit en améliorant nos instruments.

Cependant, pour le domaine de l'infiniment petit, que signifie une « mesure » ?

Le chat de Schrödinger

Dans un fameux article³ publié en 1935, Erwin Schrödinger parle pour la première fois d'un exemple qui deviendra célèbre :

« Un chat est enfermé dans une chambre d'acier complètement isolée du monde extérieur. Dans cette chambre, il y a aussi un compteur Geiger dans lequel se trouve une petite quantité de matériel radioactif. *Si* petite que *peut-être* dans l'intervalle d'une heure l'un des atomes du matériel va se désintégrer, ou peut-être pas. La probabilité de l'un ou l'autre des événements est de 50 % précisément. Si l'un des atomes se désintègre, le tube Geiger note la désintégration et déclenche un mécanisme relié à un marteau qui casse une petite ampoule contenant de l'acide cyanhydrique [ce qui tuerait le chat]. Si on laisse le système entier à lui-même pendant une heure, on dira que le chat est toujours en vie *si* aucun atome ne s'est désintégré. La fonction Ψ du système décrira celui-ci en parties égales l'état mort et vivant du chat. » [traduction libre]



Une illustration du chat de Schrödinger. La particule a 50 % de chance de se désintégrer. Si elle se désintègre, elle tue le chat.

(Source : <http://www.lassp.cornell.edu/ardlouis/dissipative/Schrcat.html>)

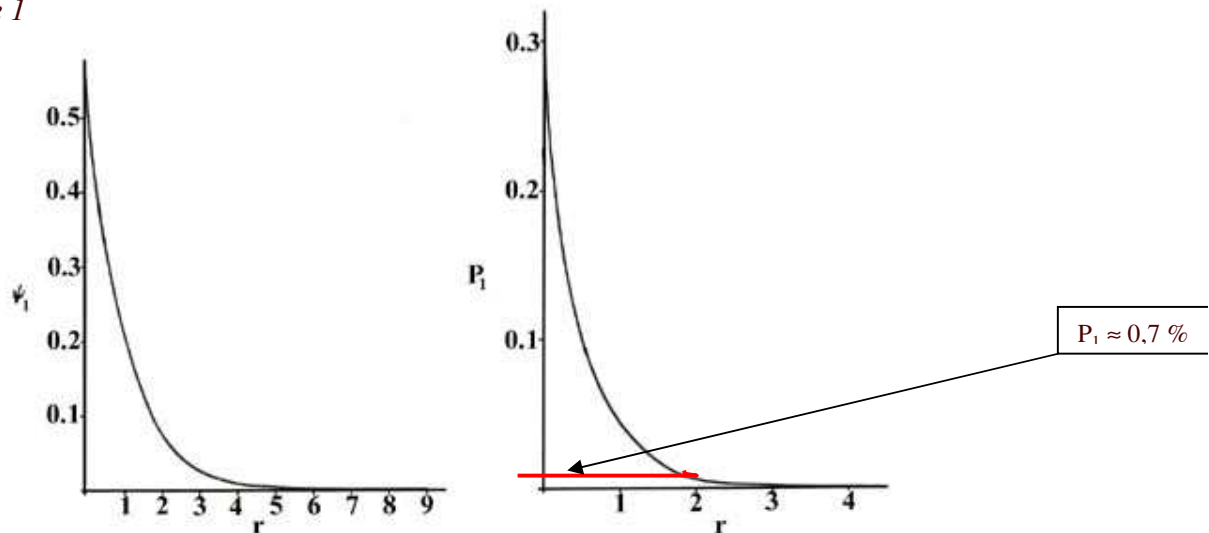
À l'origine, cet exemple avait été fait pour démontrer que l'incertitude sur la mesure reliée à un domaine atomique peut-être transformée en incertitude macroscopique (à notre échelle) qui, elle, peut-être résolue par une observation directe. Schrödinger affirme ainsi que notre vision « floue » de la réalité n'est pas dû au fait que la réalité est, en elle-même, floue, mais que c'est nos expériences qui ne sont pas assez précises.

Cependant, on peut utiliser également l'exemple du chat de Schrödinger pour illustrer les différents points de vue sur une question non-résolue de la mécanique quantique : juste avant de prendre la mesure sur le système, dans quel état se trouve celui-ci ? Autrement dit, juste avant de mesurer un électron à la position X autour du noyau d'un atome, où était l'électron avant la mesure ? Il y a plusieurs points de vue. Nous parlerons des deux points de vue généraux.

Illustrons les positions par un exemple. Supposons que nous mesurons un électron, situé autour d'un noyau d'hydrogène, à la position $r = 2$ (voir *Figure 1*). Le point de vue *réaliste* affirme que l'électron, juste avant la mesure, était déjà à la position 2. Ce point de vue semble logique mais il implique que la mécanique quantique est incomplète. En effet, si l'électron était à la position 2 avant qu'on le mesure là, une théorie complète aurait dû prédire ce résultat, et non se contenter de dire qu'il y avait une probabilité $P_1 \approx 0,35 \%$ que l'on mesure l'électron à une position de $r \geq 2$.

Le point de vue *orthodoxe* (aussi appelé « l'école de Copenhague ») affirme que l'électron n'était pas à une place particulière mais que la mesure a « condensé son état » à l'endroit $r = 2$. La particule, si l'on veut, était présente sur l'ensemble de la fonction d'onde Ψ avant que la mesure ne condense son état à la position 2. Ainsi, du point de vue orthodoxe, la mesure ne fait pas que modifier le système mesuré : elle crée l'état du système.

Figure 1



On voit ici 2 graphiques, le premier représentant la fonction d'onde Ψ de l'électron de l'atome d'hydrogène au niveau d'énergie $n = 1$ en fonction de la position r de l'électron⁴ et le second nous donnant la probabilité de trouver l'électron à une position r .

(Source : http://www.chemistry.mcmaster.ca/esam/Chapter_3/section_2.html)

Pour mieux comprendre, revenons à l'exemple du chat de Schrödinger : juste avant d'ouvrir la boîte après une heure, le chat est-il vivant ou mort ?

Le point de vue *réaliste* dit que si l'on voit le chat mort, il était mort juste avant qu'on l'observe et, s'il est vivant, il était vivant juste avant qu'on l'observe. Le point de vue *orthodoxe* dit qu'avant de regarder, le chat n'est pas nécessairement vivant ou mort. C'est en le regardant que l'on « condense son état » de vie ou de mort. Autrement dit, le chat pourrait être partout dans l'univers avant qu'on l'observe et c'est en l'observant qu'on le « condense » dans la boîte, vivant ou mort⁵.

Gedankenexperiment EPR

Souvenez-vous de la querelle qui opposait Niels Bohr et Albert Einstein quand ce dernier s'est exclamé dans un moment d'impatience : « Dieu ne joue pas aux dés ! » Mais on oublie généralement la seconde partie de l'anecdote où Niels Bohr répond : « Albert, cessez de dire à Dieu comment il doit se comporter ! »

Hubert Reeves dans « *Sciences et Avenir* », novembre 1997

Une démarche utilisée en physique est d'imaginer des expériences physiques et les implications physiques qu'elles ont. On appelle cela les « expériences de pensées » (de l'allemand « *gedankenexperiment* »). Einstein faisait beaucoup de *gedankenexperiment*.

Afin de prouver que la position réaliste est la seule qui peut être soutenue en mécanique quantique, Albert Einstein, Boris Podolsky et Nathan Rosen ont publié, en 1935, un article⁶ qui expose une *gedankenexperiment* problématique, connue aujourd'hui sous le nom de *paradoxe EPR* (pour Einstein-Podolsky-Rosen).

Un aspect de la mécanique quantique, l'enchevêtrement des particules, prévoit que, dans certaines circonstances, deux particules peuvent garder un lien causal simultané parfait et ce, peu importe la distance qui les sépare. Les trois physiciens affirmaient que ceci contredit la relativité restreinte qui dit, entre autre, qu'aucune information ne peut voyager plus vite que la lumière (principe de localité). La seule solution possible à leurs yeux est que l'état des particules est déterminé avant la mesure.

Ainsi, ces physiciens en concluent que la mécanique quantique est incomplète, que la fonction d'onde Ψ ne décrit pas entièrement le système physique et qu'il faudrait y ajouter une quantité quelconque. Cette quantité est appelée la « variable cachée » (*hidden variable*) puisque l'on ne sait pas à quoi elle correspond. Elle peut être une constante, une variable ou une collection entière de chiffres.

Or, dans un non-moins célèbre article⁷ publié en 1964, John Bell a prouvé que n'importe quelle théorie locale à variable cachée est incompatible avec la mécanique quantique (ce point sera discuté dans la *piste rouge*).

Plusieurs expériences ont été réalisées sur le paradoxe EPR, démontrant toutes la validité du point de Bell. L'une de ces expériences, faite dernièrement par Nicolas Gisin⁸ et al. (1998), aurait confirmé que deux particules pouvaient garder un lien causal instantané sur une distance d'au moins 10 km.

Voyages intersidéraux ?

Nous avons fait un énorme détour avant d'aborder notre principal intérêt : l'application de la mécanique quantique aux voyages intersidéraux. Ce détour était nécessaire afin que nous ayons une petite idée de ce qu'est la mécanique quantique.

Maintenant, est-il possible de penser faire des voyages intersidéraux ou, du moins, communiquer de manière instantanée entre les étoiles en utilisant la mécanique quantique ? Puisqu'il existe un lien causal non-local, donc un effet plus rapide que la lumière, qui unit 2 particules, serait-il possible de produire une méthode de communication basée sur cet aspect de la mécanique quantique ?

Il semblerait que non. Comme le disait si bien Schrödinger dans son article de 1935, « For each single experiment one needs just one measurement on each system, only the virginal one matters, further ones apart from this would be without effect ». Donc, les particules sont « liées » seulement avant de prendre la première mesure. Ainsi, en prenant la mesure de l'état de l'une des particules en question, la seule information que l'on obtient de manière instantanée est la mesure de l'état de l'autre. Point final. Toute mesure ultérieure sur l'état de la particule n'influencera pas l'état de l'autre.

Cependant, si au moins une expérience démontre que l'on peut « vaincre » le principe de localité, qui est la limitation la plus décevante de la relativité (du point de vue des voyages intersidéraux), peut-être ouvrira-t-elle la voie à d'autres...

Simon Villeneuve

² Ce point est capital car il fait en sorte, entre autre, que la mécanique quantique est une théorie statistique.

⁴ r est exprimé en unité atomique ($r = 1 = 5,29 \times 10^{-11}$ mètres).

⁵ La position orthodoxe peut entraîner certaines confusions. Elle semble s'approcher du solipsisme et plusieurs philosophes et écrivains post-modernes utilisent une interprétation de cette position pour démontrer, entre autre, que la science n'est qu' « un produit culturel contingent conditionné exclusivement par des circonstances sociales et historiques »⁹.

Remerciements :

Je tiens à remercier M. Éric Larouche et M. Jérôme Gauthier pour leurs sources et leurs précieux conseils ainsi que Claude pour le « petit coup de pouce » qui m'a convaincu de faire cette chronique et m'a permis, ainsi, d'en apprendre beaucoup plus sur ce difficile sujet qu'est la mécanique quantique.

Bibliographie :

¹FEYNMAN, Richard, "*The Character of Physical Law*", Éditions Cox & Wyman Ltd, 1965, p.129.

³SCHRÖDINGER, E., "*Die gegenwärtige Situation in der Quantenmechanik*", *Naturwissenschaften* **23** : pp 807-812 ; 823-828 ; 844-849 (1935). Je me suis cependant contenté de la traduction faite par John D. Trimmer "*The present situation in quantum mechanics : a translation of Schrödinger cat paradox paper*" publiée dans « Proceedings of the American Philosophical Society », **124**, 323-38.

⁶EINSTEIN, A., PODOLSKY, B. & ROSEN, N., "*Can Quantum-Mechanical Description of Physical Reality Be Considered Complete ?*", *Phys. Rev.* **47**, 777 (1935).

⁷BELL, John, "*Speakable and unspeakable in quantum mechanics*", Éditions Cambridge University Press, 1987, p.14-21 (apparu pour la première fois sous BELL, J. S., "*On the Einstein Podolsky Rosen paradox*", *Physics* **1**, 195 (1964), mais cette revue est carrément introuvable).

⁸TITTEL, W. et al., "*Experimental demonstration of quantum correlations over more than 10 km* », *Phys. Rev. A* **57**, 3229 (1998).

⁸GISIN, N., BRENDEL, J., TITTEL W. & ZBINDEN, H., "*Quantum Correlation Over More Than 10 km*".

⁹ST-GELAIS, V., LAROUCHE, E., DALLAIRE, S. & BRETON, R., « *Réflexions épistémologiques sur la postmodernité et le postmodernisme* », Université du Québec à Chicoutimi, 18 décembre 2002.

GRIFFITHS, David J., « *Introduction to quantum mechanics* », Éditions Prentice-Hall, 1994, 394 p.

MERMIN, David N., 1985. "*Is the Moon There When Nobody Looks? Reality and the Quantum Theory.*" *Physics Today*, vol. 38, p. 38.

ZEILINGER, Anton, "*On the Interpretation and Philosophical Foundation of Quantum Mechanics*", "*Vastakohtien todellisuus*", *Festschrift for K.V. Laurikainen, U. Ketvel et al. (Eds.)*, Helsinki University Press, 1996.

- <http://www.physique.usherb.ca/attracte/08-1999/epr.html>

- http://www.granddictionnaire.com/fs_global_01.htm

- http://www.chemistry.mcmaster.ca/esam/Chapter_3/section_2.html

- http://www.webdo.ch/hebdo/hebdo_1998/hebdo_50/labo_50.html

- <http://www.gap-optique.unige.ch/Publications/LookUp.asp?Search=long%20distance>

- <http://www.lassp.cornell.edu/ardlouis/dissipative/SchrCat.html>

- <http://www.quantum.univie.ac.at/zeilinger/philosop.html>