

EPR et intrication quantique

<https://www.science-et-vie.com/article-magazine/einstein-vs-bohr-la-mecanique-quantique-dit-elle-tout-du-reel> 2022

Gautier Depambour. Einstein vs Bohr : la mécanique quantique dit-elle tout du réel ?

La mécanique quantique décrit-elle le monde de l'infiniment petit dans sa totalité ? Cette épineuse question a fait l'objet d'un débat épique entre Albert Einstein et Niels Bohr. En 1935, Einstein et ses deux collaborateurs, Boris Podolsky et Nathan Rosen, publient un article dans lequel ils inventent une expérience de pensée portant sur des particules intriquées, c'est-à-dire liées les unes aux autres même en étant séparées dans l'espace. Ils posent d'abord trois hypothèses. Un, les prédictions de la mécanique quantique sont justes. Deux, un instrument de mesure ne peut pas avoir d'influence sur un autre, situé à distance, de façon instantanée. Trois, les objets physiques ont des propriétés individuelles : par exemple, une particule a une position et une vitesse bien à elle. Puis les trois compères prouvent que, si l'on admet ces hypothèses, la mécanique quantique ne peut rendre compte de toutes les propriétés des objets physiques. Bref, une partie du réel lui échappe : la théorie est incomplète, vouée à être dépassée. Mais Bohr n'est pas de cet avis. Il explique que les propriétés des particules n'existent que par leur interaction avec des instruments de mesure, ces derniers ayant une influence sur leur comportement. La troisième hypothèse ne tient donc pas, et le raisonnement tombe à l'eau ! Vaine querelle métaphysique ? Pas du tout : dans les années 1960, le physicien irlandais John Bell révèle que le débat peut être tranché par des expériences. Celles-ci seront menées dans les années 1970-1980, notamment par Alain Aspect, à l'Institut d'optique. Les résultats iront en faveur de la vision de Bohr.

https://fr.wikipedia.org/wiki/Intrication_quantique

En mécanique quantique, l'**intrication quantique**, ou **enchevêtrement quantique**, est un phénomène dans lequel deux particules (ou groupes de particules) forment un système lié et présentent des états quantiques dépendant l'un de l'autre quelle que soit la distance qui les sépare. Un tel état est dit « intriqué » ou « enchevêtré », parce qu'il existe des corrélations entre les propriétés physiques observées de ces particules distinctes. En effet, le théorème de Bell démontre que l'intrication donne lieu à des actions non locales. Ainsi, deux objets intriqués O_1 et O_2 ne sont pas indépendants même séparés par une grande distance, et il faut considérer $\{O_1+O_2\}$ comme un système unique.

Cette observation est au cœur des discussions philosophiques sur l'interprétation de la mécanique quantique. En effet, elle semble remettre en cause le principe de localité défendu par Albert Einstein mais sans le contredire tout à fait car des échanges d'informations à une vitesse supraluminique restent impossibles et la causalité est respectée.

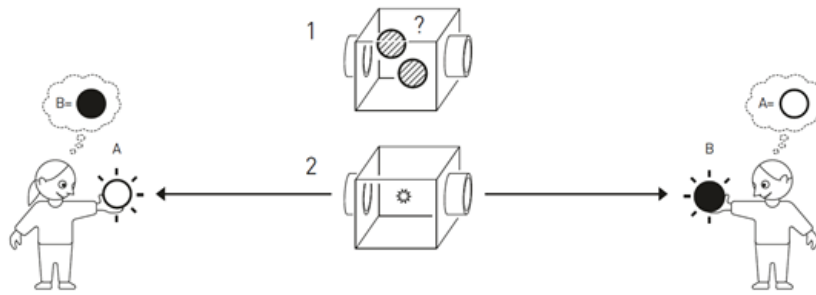
Histoire. Le caractère surprenant des états intriqués a pour la première fois été souligné par Einstein, Podolsky et Rosen dans un article de 1935 qui tentait de montrer que la mécanique quantique était incomplète. Cette interprétation fut l'objet d'une polémique à vie avec Niels Bohr que l'on nommera le « débat Bohr-Einstein ». Dans cet article, les auteurs décrivent une expérience de pensée qui restera connue comme le paradoxe EPR. Mais ce qu'Einstein a nommé « action fantôme à distance » parce qu'il n'y croyait pas, a été largement vérifié et confirmé par les physiciens expérimentateurs.

L'expérience d'Alain Aspect a démontré de façon quasi irréfutable, avec seulement l'échappatoire de détection, la violation des inégalités de Bell, établissant un résultat en vue de la validation du phénomène d'intrication quantique et des hypothèses de non-localité. Des expériences démontrant ce phénomène ont ensuite été réalisées sur des distances de plus en plus grandes depuis les années 1980 :

- en 2015, l'intrication a été prouvée sur deux électrons séparés de 1 300 mètres
- en 2017, Juan Yin *et al.* (université des sciences et des technologies de Hefei, en Chine) ont envoyé des photons intriqués depuis le satellite QUESS (*Quantum Experiments at Space Scale*), orbitant à 500 km, vers des stations terrestres séparées de 1 203 kilomètres — Delingha, dans le nord du plateau tibétain et l'observatoire Gaomeigu de Lijiang.

<https://www.polytechnique.edu/actualites/intrication-quantique-du-debat-philosophique-au-prix-nobel> **Extrait**

Afin de comprendre le problème, imaginons par exemple deux particules situées dans une boîte. Deux couleurs sont possibles pour ces particules : blanches ou noires. De façon intuitive, on pourrait penser qu'il y a quatre options : les deux particules sont blanches ; les deux particules sont noires ; la première est blanche et la seconde est noire ; la première est noire et la seconde est blanche. Mais le formalisme de la physique quantique autorise aussi l'existence de mélanges de ces quatre options, ce que les physiciennes et physiciens appellent des superpositions d'états. Par exemple, que les deux particules soient à la fois dans l'état où la première est blanche et la seconde est noire et dans l'état où la première est noire et la seconde est blanche, sans qu'il soit possible de distinguer entre les deux à moins de faire une observation. Un tel état est dit « intriqué ». Il est représenté avec les billes rayées avec un point d'interrogation sur la figure suivante.



©Johan Jamestad/The Royal Swedish Academy of Sciences

En physique quantique, deux objets peuvent être « intriqués ». Si on envoie chacun d'eux en des endroits différents, on observe des corrélations entre leurs propriétés (ici, la couleur noire ou blanche), sans qu'il soit possible d'attribuer une couleur déterminée à chaque objet avant l'observation. Cette situation va contre notre intuition courante.

https://www.larousse.fr/encyclopedie/divers/paradoxe_EPR/48950

Paradoxe E.P.R. Paradoxe de la physique quantique présenté en 1935 dans un article signé par Albert Einstein et ses collaborateurs Boris Podolsky et Nathan Rosen (d'où le sigle E.P.R.).

En physique quantique, la valeur d'une *observable* (grandeur qui décrit une quantité physique mesurable et dont la définition implique de préciser comment se fait l'observation) – comme la position ou la vitesse d'une particule – n'est généralement prédite que de façon statistique, par la probabilité de trouver telle ou telle valeur. Niels Bohr, l'un des fondateurs de la mécanique quantique, tenait pour fondamental le caractère probabiliste des prédictions de cette théorie. Pour Albert Einstein, au contraire, l'impossibilité de prédire les résultats des mesures autrement qu'en termes probabilistes était la preuve que la théorie quantique est incomplète, qu'elle oublie de prendre en compte certains aspects de la réalité. L'expérience de pensée proposée en 1935 par Einstein, Podolski et Rosen vise à mettre à l'épreuve les principes de la physique quantique. L'argument est le suivant : **les lois de la mécanique quantique permettent la formation de particules « intriquées »**, ayant interagi dans le passé puis s'étant éloignées l'une de l'autre, pour lesquelles la mesure des propriétés de l'une permet de connaître instantanément les propriétés de l'autre, quelle que soit la distance qui les sépare. Lorsqu'on effectue une mesure sur l'une des particules, tout se passe comme si sa jumelle le « sentait » immédiatement et adoptait un état physique correspondant à celui trouvé pour sa partenaire.

Pour Einstein, inventeur de la théorie de la relativité qui stipule qu'aucun effet ne peut se propager plus vite que la lumière, cette description mettant en jeu une modification instantanée à distance est inacceptable. Selon lui, si les deux particules ont des propriétés similaires au moment de la mesure, c'est qu'elles les ont acquises lors de leur interaction initiale et conservées après leur séparation. Cette conclusion revient à compléter le formalisme de la mécanique quantique. Elle est immédiatement contestée par Niels Bohr. Le débat entre les deux physiciens durera jusqu'à la mort d'Einstein.

Le verdict de l'expérience. En 1964, le physicien britannique John Stewart Bell, travaillant au Cern, montre que les positions respectives de Bohr et d'Einstein conduisent à des prédictions différentes. Il établit des relations mathématiques d'inégalité (*inégalités de Bell*) qui, appliquées aux résultats de mesures bien choisies portant sur des paires de particules intriquées, devraient permettre de trancher le débat. Prenant la relève de travaux pionniers réalisés aux États-Unis, le physicien français **Alain Aspect** entreprend en 1975, à l'Institut d'optique d'Orsay, la construction d'une source de paires de photons intriqués d'une efficacité sans précédent, grâce à l'utilisation d'une excitation laser. Cette source lui permet, avec ses collaborateurs Philippe Grangier, Jean Dalibard et Gérard Roger, de réaliser en 1982 des tests des inégalités de Bell dans des situations très proches des expériences de pensée idéales sur lesquelles raisonnent les théoriciens. **Les résultats violent de façon très nette les inégalités de Bell et sont en excellent accord avec les prédictions de la mécanique quantique.** Donnant tort à Einstein, ils confirment que **deux particules intriquées doivent être considérées comme un système quantique unique décrit par un état quantique global et non séparable en deux systèmes localisés.**