



Intrication quantique : qu'est-ce que c'est ?



PAR LAURENT SACCO
JOURNALISTE

LE 5 DÉCEMBRE 2021

On s'accorde à dire que ce sont Erwin Schrödinger et Albert Einstein qui ont découvert au milieu des années 1930 le phénomène d'intrication dans les équations de la théorie quantique dont ils étaient parmi les plus importants pères fondateurs. Le phénomène d'intrication est l'un des phénomènes les plus troublants en mécanique quantique en accord avec l'interprétation de Copenhague de celle-ci. Schrödinger en tira une expérience de pensée qui deviendra célèbre avec son fameux chat et Einstein une autre expérience de pensée non moins fameuse qui sera appelé le paradoxe ou l'effet EPR. Il sera exposé dans un article publié en 1935 et il a été développé en collaboration avec Boris Podolsky et Nathan Rosen dans le but de réfuter l'interprétation de Copenhague de la physique quantique.

Depuis la démonstration faite en 1982 de l'existence de l'intrication quantique par Alain Aspect et ses collègues Philippe Grangier, Gérard Roger et Jean Dalibard, ce phénomène est observé dans de nombreuses expériences et il intervient maintenant depuis la fin des années 1990 dans des programmes de recherches qui font rêver -- à savoir les ordinateurs quantiques, la téléportation quantique -- ainsi que dans le domaine de la cryptographie quantique.

L'intrication quantique a ouvert un champ de recherche très actif

L'intrication quantique est maintenant comprise comme un phénomène fondamental de la mécanique quantique. Deux systèmes physiques, comme deux particules, se retrouvent alors dans un état quantique dans lequel ils ne forment plus qu'un seul système dans un certain sens subtil. Avant l'intrication, deux systèmes physiques sans interactions sont dans des états quantiques indépendants mais, après l'intrication, ces deux états sont en quelque sorte « *emmêlés* » et il n'est plus possible de décrire ces deux systèmes de façon indépendante.

On montre clairement que deux particules intriquées sont, en quelque sorte, un tout indivisible, même si elles sont séparées par des années-lumière. L'observation d'une propriété de la première

particule, ou plus généralement d'un de deux systèmes physiques quantiquement intriqués, va provoquer plus vite que la lumière (on ne sait pas si l'effet est instantané) une modification d'une autre propriété similaire pour l'autre particule, et ce, de façon corrélée, pas arbitraire bien qu'avec une loi de probabilité.

L'INTRICATION QUANTIQUE EST UN PHÉNOMÈNE QUI LIE INTIMEMENT LES PROPRIÉTÉS DE DEUX PARTICULES, QUELLE QUE SOIT LA DISTANCE QUI LES SÉPARE. CELA CONDUIT À DES EFFETS SI ÉTRANGES QU'ALBERT EINSTEIN LUI-MÊME EN DOUTAIT ! LE DÉBAT FUT TRANCHÉ EN 1982, LORSQU'ALAIN ASPECT RÉALISA À L'INSTITUT D'OPTIQUE UNE EXPÉRIENCE DÉMONTRANT LA RÉALITÉ PHYSIQUE DE L'INTRICATION QUANTIQUE SUR DES PARTICULES DE LUMIÈRE – DES PHOTONS. DEPUIS, L'INTRICATION EST DEVENUE UN OUTIL ESSENTIEL POUR METTRE AU POINT DES DISPOSITIFS DE CRYPTOGRAPHIE ULTRA-PERFORMANTS ET CONCEVOIR DES ORDINATEURS QUANTIQUES. © INSTITUT D'OPTIQUE

Le phénomène d'intrication repose sur les principes mathématiques et physiques de la mécanique quantique. C'est-à-dire, les notions de vecteurs d'états et de produits tensoriels de ces vecteurs d'états d'un côté, et les principes de superposition des états et de réduction du vecteur d'état de l'autre.

Rappelons qu'en mécanique quantique, l'extension de la mécanique matricielle de Heisenberg et de la mécanique ondulatoire de Schrödinger, il y a une refonte complète de la cinématique et de la dynamique des grandeurs physiques et mathématiques associées aux phénomènes observables et aux systèmes physiques.

La mécanique quantique, même si elle traite d'une dualité onde-particule, n'est pas une théorie se réduisant à la mécanique ondulatoire des particules.

Le caractère dual de la matière et de la lumière mis en évidence dans le cas de la théorie des particules chargées et du rayonnement électromagnétique n'est qu'une conséquence d'une refonte des lois différentielles et intégrales associées à un phénomène physique et à un système physique.

L'introduction du concept de fonction d'onde pour une particule n'est alors qu'un cas très particulier de l'introduction du concept de vecteur d'état pour un système physique possédant des variables dynamiques et donnant lieu à un phénomène mesurable, quel que soit ce système et ces variables, tant qu'une notion d'énergie et d'interaction entre ce système et un instrument de mesure classique existe.

C'est parce que les lois différentielles et intégrales, décrivant l'évolution dans l'espace et le temps d'une grandeur observable en physique classique, ont naturellement la forme des lois cinématiques d'un ensemble discret ou continu de points matériels que se retrouvent des correspondances entre la formulation quantique générale de ces lois et celles, quantiques, des électrons et des photons.

Il est important de bien se rappeler que, déjà en physique classique, nous mesurons et définissons un phénomène à partir de la modification de l'état cinématique et dynamique d'une particule de matière test.

Un champ électromagnétique est défini par son effet sur une particule test de matière chargée en un point de l'espace, et donc en particulier, un champ d'ondes lumineuses.

La température peut être définie par la dilatation d'un corps matériel en un point, donc, là aussi, une grandeur observable est en dernière analyse définie par la cinématique d'un point matériel et le bilan des échanges d'énergie et d'impulsion.

La solution du problème de la dualité onde-corpuscule repose donc sur deux idées centrales dans le cadre de l'interprétation de Copenhague et la mécanique quantique sous la forme donnée par Dirac, Von Neumann et Weyl à partir des travaux de Bohr, Heisenberg et Born.

- Il n'y a fondamentalement ni onde ni corpuscule au sens classique dans la nature. Ces concepts ne sont utiles, et n'interviennent encore dans la théorie que parce qu'ils doivent nécessairement établir une correspondance entre la forme des lois quantiques et celles des lois classiques qui doivent émerger des premières.

De même qu'une particule test sert à définir un champ électromagnétique, un instrument de mesure classique sert à définir un système quantique par la façon dont ce système quantique va affecter l'appareil de mesure. Inévitablement, la description cinématique et dynamique de cet appareil va faire intervenir des concepts d'onde et de particule classiques.

Le formalisme quantique doit donc tout à la fois exprimer tout cela et l'inexistence fondamentale de particule et d'onde classique, tout comme la relativité repose sur l'inexistence d'un espace et d'un temps absolu. Cette propriété du formalisme est satisfaite en grande partie par les inégalités de Heisenberg.

- La dualité onde-corpuscule ne dérive pas d'une association subtile des particules et des ondes, c'est-à-dire qu'il ne s'agit pas de lois particulières restreintes aux lois de **mouvement** et à la structure des particules de matières et aux ondes des champs d'interactions (électromagnétique, nucléaire etc...) mais bien que les lois d'évolution dans le temps et l'espace, d'une grandeur physique quelconque, sont modifiées, notamment la forme générale d'une loi différentielle et d'une loi intégrale.

C'est parce que ce cadre est quantifié qu'il s'applique obligatoirement à n'importe quel système physique en droit. Il est important à ce sujet de se rappeler que l'existence d'une énergie est une propriété essentielle dans toutes les lois de la physique. L'universalité de l'énergie, et le fait que toute définition d'une mesure d'un phénomène repose en dernière analyse sur une interaction avec de l'énergie, assure automatiquement que les lois de la mécanique quantique s'appliquent pour décrire l'évolution d'un système arbitraire.

C'est pourquoi la mécanique ondulatoire, qui repose finalement en grande partie sur l'existence remarquée par De Broglie d'une **analogie** forte entre le principe de Maupertuis pour le mouvement d'une particule de matière et le principe de Fermat pour un rayon lumineux, **n'est qu'un cas très particulier de la mécanique quantique, puisque celle-ci ne porte finalement pas sur des lois de mouvement dans l'espace et le temps de particules mais sur l'évolution de toutes les grandeurs physiques mesurables directement ou indirectement.**

En particulier, les lois de la mécanique quantique contiennent naturellement la possibilité de la création et de la destruction d'une particule et sa transformation en une autre, ce qui n'est pas un phénomène que l'on peut décrire à partir des principes de Fermat ou Maupertuis.

La **construction** et la forme de la théorie quantique reposent donc sur les idées que :

- Les lois de la physique ne portent fondamentalement pas sur quelque chose dans l'espace et dans le temps.
- Les particules et les ondes ne sont pas des structures fondamentales mais des approximations de la forme des lois et des objets du monde physique.
- L'énergie est au cœur du processus de **quantification**, assure et explique le caractère universel de la quantification (quantification de certaines variables dynamiques classiques, amplitudes de probabilités pour l'observation de ces valeurs).

Toutefois, les lois de la mécanique quantique ont émergé historiquement et peuvent être introduites pédagogiquement en première approximation, avec les mécaniques ondulatoire et matricielle des particules dans l'espace et le temps classiques. Mais il est central de bien comprendre au plus vite que ces mécaniques ne sont pas la véritable structure de la mécanique quantique.

La façon de procéder rappelle donc la thermodynamique qui fonctionne indépendamment de la structure atomique ou non du système physique. L'énergie totale du système est considérée, on l'appelle une fonction d'état du système et il existe un jeu de variables fondamentales que l'on appelle variables d'état liées par la fonction d'énergie et d'autres fonctions d'état du système thermodynamique. Le système est défini comme une boîte noire dont l'intérieur importe peu, seuls comptent les bilans d'énergie entrant et sortant, et les valeurs des variables d'état mesurées.

La mécanique quantique fait bien, malgré tout, une synthèse de structure ondulatoire et corpusculaire pour l'évolution des grandeurs physiques. Ce qui veut dire qu'en particulier, la physique et la mathématique des ondes et des champs doivent se retrouver dans la forme de ces lois, de sorte que, lorsqu'elles sont appliquées à des systèmes particuliers comme des électrons, des protons et le champ électromagnétique classique, on retrouve la mécanique ondulatoire de ces systèmes.

Ainsi, le principe de superposition des champs en électrodynamique et en optique doit se retrouver pour décrire l'état d'un système quantique. Toute la structure de l'analyse de Fourier en particulier doit être présente.

De même, la structure de la mécanique analytique avec la fonction de Hamilton de l'énergie d'un système mécanique classique doit se trouver conservé et jouer un rôle central.

En gardant les considérations précédentes à l'esprit, la façon dont la mécanique quantique est construite s'éclaire.

À un système physique, on associe des variables observables A_i et une énergie totale H appelée l'Hamiltonien .

Dans le cas d'une particule possédant des variables de quantités de mouvement P_i et de positions Q_i plongée dans un potentiel $V(Q_i)$, la fonction H de la particule s'écrit :

$$H=T(P_i)+V(Q_i)$$

où $T(P_i)$ est l'**énergie cinétique** de la particule.

Dans sa forme initiale, l'équation de Schrödinger pour une telle particule faisait alors intervenir un objet appelé opérateur d'énergie **H**, dérivé de la fonction précédente, et donnait lieu à une équation différentielle pour une fonction $\Psi(Q_i)$ dite fonction d'onde dont le carré donne la probabilité de mesurer la particule avec la valeur Q_i de sa position.

La formulation de la mécanique quantique reprend tout cela en le généralisant. On a toujours un opérateur énergie **H** mais la fonction d'onde n'est qu'un cas particulier du vecteur d'état (pensez à la thermodynamique) d'un système physique quelconque.

Pour bien montrer la rupture avec le concept de fonction d'onde, ce vecteur est désigné par :

$$|\Psi\rangle$$

C'est la notation vectorielle de Dirac pour faire intervenir l'analyse de Fourier abstraite de l'analyse fonctionnelle de Hilbert pour les équations différentielles et aux dérivées partielles linéaires.

Une variable dynamique observable A , transcrite sous la forme d'un opérateur linéaire **A**, pourra alors posséder une suite de valeurs a_n lors d'une mesure. L'expérience montre qu'il existe une probabilité $|c_n|^2$ d'observer chaque valeur a_n , et que le vecteur d'état du système s'écrit comme une somme vectorielle de vecteurs de base $|\mathbf{a}_n\rangle$ associés à chaque valeur a_n telle que :

$$|\Psi\rangle = \sum c_n |\mathbf{a}_n\rangle$$

où

$$\sum |c_n|^2 = 1 \text{ avec } n=1,2, \dots$$

comme il se doit pour l'introduction de probabilités.

Les vecteurs de base $|a_n\rangle$ et les valeurs a_n sont appelés les vecteurs et les valeurs propres de l'opérateur linéaire A .

C'est en ce sens que l'on parle de superposition des états en mécanique quantique. Les coefficients c_n sont des nombres complexes dont le carré donne la probabilité de trouver le système dans l'état $c_n |a_n\rangle$ de sa variable dynamique A. Ce peut être la position, la vitesse et toute variable d'état quantique que l'on peut associer pour exprimer les caractéristiques du système.

Dans le cas des électrons, les phénomènes de diffraction et d'interférence qu'ils exhibent reposent précisément sur ce principe de superposition des états appliqué à leurs états de position. Sauf que l'on n'a pas affaire à une suite discrète de valeurs x_n pour $Q_1=x=A_1$ mais à une distribution continue. C'est aussi pour cela qu'en toute généralité, on parle d'amplitudes de probabilité à propos de c_n par analogie avec les ondes lumineuses où le carré d'une amplitude donne l'intensité de la lumière en un point.

L'équation de Schrödinger dans sa forme générale est alors une équation d'évolution s'écrivant :

$$i\hbar \frac{d}{dt} |\Psi\rangle = \mathbf{H} |\Psi\rangle$$

Si l'on a bien compris les longues réflexions développées précédemment, on ne sera donc pas étonné qu'à partir du moment où on peut définir une énergie et des variables physiques pour un système quelconque, l'équation de Schrödinger précédente s'appliquera et qu'elle n'est absolument pas confinée à des notions d'évolution dans l'espace et le temps d'une particule dans un potentiel.

En particulier, si le système était un animal quantique pouvant être, soit sous la forme d'une baleine quantique, soit sous la forme d'un dauphin quantique, dans le sens où il serait deux états d'énergie d'un même système physique, mammifère aquatique quantique par ex, l'équation de Schrödinger s'appliquerait !

C'est d'ailleurs ce qu'il se passe dans les phénomènes d'oscillations des neutrinos ou des mésons K. Sans parler des multiplets d'isospin comme les quarks et les leptons dans les

théorie électrofaibles et en QCD.

Il est évident que ceci n'a rien à voir avec des notions de dualité onde corpuscule et de mécanique ondulatoire.

Lors d'une mesure, le vecteur d'état effectue un saut quantique pour ne plus consister qu'en $|a_n\rangle$. Par analogie avec une superposition d'ondes planes dans un **paquet** d'ondes, on parle alors de réduction du paquet d'ondes pour la fonction d'onde de la position d'une particule et, en toute généralité, de réduction du vecteur d'état pour un système quantique.

Ces notions fondamentales étant rappelées, on peut étudier le phénomène d'intrication d'un peu plus près.

Considérons un système quantique simple, une pièce de monnaie quantique pour un jeu de pile ou face quantique.

Les vecteurs d'états de base seront $|f\rangle$ et $|p\rangle$ pour face et pile. La pièce pourra se retrouver dans un état de superposition quantique tel que son vecteur d'état soit :

$$|\Psi\rangle = c_1 |f\rangle + c_2 |p\rangle$$

où $|c_2|^2$ donnera la probabilité d'observer la pièce dans l'état pile par ex.

Introduisons deux pièces A et B, on aura alors deux vecteurs d'état :

$$|\Psi_A\rangle = c_{1a} |f_a\rangle + c_{2a} |p_a\rangle \text{ et } |\Psi_B\rangle = c_{1b} |f_b\rangle + c_{2b} |p_b\rangle$$

Les deux pièces sont considérées comme sans interactions au début, ce qui veut dire que l'on aura deux Hamiltoniens **H_a** et **H_b** indépendants.

Soit **H** l'Hamiltonien du système composé par ces deux pièces et $|\Psi\rangle$ son vecteur d'état.

Alors **H = H_a + H_b** et le vecteur d'état du système complet et la forme la plus générale de la solution de l'équation de Schrödinger est un produit assez particulier dit produit tensoriel (\otimes) des vecteurs d'état de chaque pièce.

Ainsi :

$$\begin{aligned} |\Psi\rangle &= (c_{1a} |f_a\rangle + c_{2a} |p_a\rangle) (c_{1b} |f_b\rangle + c_{2b} |p_b\rangle) \\ &= c_{1a} c_{1b} |f_a\rangle (X) |f_b\rangle + c_{1a} c_{2b} |f_a\rangle (X) |p_b\rangle + c_{2a} c_{1b} |p_a\rangle (X) |f_b\rangle + c_{2a} c_{2b} |p_a\rangle (X) |p_b\rangle \end{aligned}$$

Ce n'est que la retranscription abstraite de la technique de **séparation** des variables dans une équation aux dérivées partielles.

Si l'Hamiltonien n'est plus décomposable en somme d'Hamiltoniens de pièces sans interactions, pendant un bref instant où les pièces seraient chargées électriquement par exemple, le vecteur d'état du système ne peut plus se décrire **exactement** comme un produit tensoriel des vecteurs d'état de ses parties sans interactions.

C'est précisément le cas que l'on appelle état intriqué !

Mais attention, cela demande des précisions importantes. Le vecteur d'état est bien toujours une somme de produits tensoriels d'états de base, pile et face d'une pièce sans interaction ; mais, les coefficients donnant les amplitudes de probabilités de trouver les résultats des observation sur les deux pièces ne sont plus décomposables en produits des amplitudes des états de chaque pièce avant interaction, c'est-à-dire intrication.

Si les deux pièces intriquées sont séparées et transportées aux antipodes l'une de l'autre, une mesure sur l'une affectera instantanément l'état quantique de l'autre. Ce qui veut dire que les résultats de la mesure sur la seconde ne seront plus indépendants des mesures déjà effectuées sur la première.

Le paradoxe EPR et les inégalités de Bell reposent essentiellement sur des situations analogues, avec des systèmes physiques donnant lieu formellement aux mêmes équations mathématiques.

On voit là toute la force de la formulation abstraite de la théorie quantique, et surtout de la nature de la théorie quantique même, en ce sens que des principes généraux sont à l'œuvre dans une grande variété de systèmes physiques différents et qui se traduisent par des équations

mathématiques largement indépendantes de la forme, et du système physique et des variables physiques de ce système.

De sorte que, les principes de la mécanique quantique peuvent être testés avec le système physique et le type de variable dynamique le plus facile à réaliser expérimentalement pour analyser un phénomène quantique donné.

De fait, le paradoxe EPR était initialement formulé avec des variables de position et de quantité de mouvement pour une paire de particules. Mais il conserve l'essentiel de sa signification si l'on prend les variables de **spin** d'une paire de particules, que ce soit des électrons ou des photons par exemple. C'est bien pourquoi David Bohm avait proposé de le tester sous cette forme et c'est ce qu'Alain Aspect a fait en 1982 avec une paire de photons polarisés et intriqués.