

Une finalité pour la mécanique quantique ?

La mécanique quantique et la vie

Michèle Leduc, Michel Le Bellac

DANS **RAISON PRÉSENTE** 2021/4 N° 220 , PAGES 103 À 111

ÉDITIONS **UNION RATIONALISTE**

ISSN 0033-9075

DOI 10.3917/rpre.220.0103

Date de mise en ligne : 10/01/2022

Article disponible en ligne à l'adresse

<https://shs.cairn.info/revue-raison-presente-2021-4-page-103?lang=fr>



Découvrir le sommaire de ce numéro, suivre la revue par email, s'abonner...
Scannez ce QR Code pour accéder à la page de ce numéro sur Cairn.info.



Distribution électronique Cairn.info pour Union rationaliste.

Vous avez l'autorisation de reproduire cet article dans les limites des conditions d'utilisation de Cairn.info ou, le cas échéant, des conditions générales de la licence souscrite par votre établissement. Détails et conditions sur [cairn.info/copyright](https://shs.cairn.info/copyright).

Sauf dispositions légales contraires, les usages numériques à des fins pédagogiques des présentes ressources sont soumises à l'autorisation de l'Éditeur ou, le cas échéant, de l'organisme de gestion collective habilité à cet effet. Il en est ainsi notamment en France avec le CFC qui est l'organisme agréé en la matière.

UNE FINALITÉ POUR LA MÉCANIQUE QUANTIQUE ?

LA MÉCANIQUE QUANTIQUE ET LA VIE

*Michèle Leduc**

Cet article a été suggéré aux auteurs par la lecture de l'article de Lucien Scubla « Note sur l'idée de nature dans la physique » paru dans le numéro 219 de *Raison Présente*. Les tentatives de créer des ponts entre les disciplines et les cultures sont souvent riches, et on ne peut qu'acquiescer à son affirmation « la conception commune de l'espace et du temps est le fruit de plusieurs siècles d'habitudes mentales héritées ou contractées puis transmises et sédimentées dans la conscience collective. D'où la difficulté de changer de paradigme... ». L'article de Scubla vient ajouter un volet à la complexité du dossier « Nature et esprit, entre science et philosophie », illustrée brillamment par l'interview du biologiste Henri Atlan, qui s'interroge sur les avancées de la naturalisation de l'esprit par les neurosciences cognitives d'aujourd'hui. Mais c'est sur un autre terrain, celui couramment appelé du « cerveau quantique », que s'aventure Scubla. Compte tenu de notre connaissance de la physique actuelle, nous nous interrogeons sur le propos central de Scubla qui développe une approche finaliste ou téléologique dans la mécanique quantique, faisant ressurgir paradoxalement une forme d'aristotélisme après la révolution des quantas.

La physique quantique est une dame centenaire qui se porte toujours très bien et fait de nouveau parler d'elle ces dernières décennies, au-delà des fameux « paradoxes » qui ont fait couler beaucoup d'encre et inspiré d'innombrables dialogues entre physiciens et philosophes. Michel Le Bellac éclaire utilement ci-dessous la vision actuelle des fondements de la théorie quantique. Scubla, tout en se référant à des considérations devenues obsolètes comme celles du grand physicien Pierre Auger il y a 70 ans, se place délibérément au-delà des frontières de la théorie quantique.

Certes, il ne fait pas de doute aujourd'hui que le vivant tout comme le reste du monde matériel relève de phénomènes quantiques, et pourquoi en serait-il autrement d'ailleurs ? En un sens tout est quantique, la matière comme la lumière et leurs interactions

* Michèle Leduc est physicienne, directrice de recherche émérite au Laboratoire Kastler-Brossel, École normale supérieure de Paris

entre elles. Quand je tape du poing sur une table et que mon poing ne passe pas au travers, c'est un effet quantique : le principe de Pauli qui interdit aux constituants élémentaires de se trouver dans le même état quantique. De même les propriétés des molécules biologiques ou la l'absorption de la lumière créant de la photosynthèse sont régies par la physique quantique : il suffit en principe de résoudre l'équation de Schrödinger pour l'expliquer.

En revanche¹, il n'en va pas de même pour les phénomènes biologiques faisant intervenir explicitement le principe de superposition quantique et l'intrication (voir ci-dessous l'explication par Michel Le Bellac) : c'est ici que se place la conviction de Scubla que des phénomènes de cette nature pourraient aider à comprendre la conscience humaine. L'idée a été introduite en 1990 par le grand physicien Roger Penrose (prix Nobel 2020). Cette théorie est nommée OrchOR (Orchestrated objective reduction theory) et aurait un fondement scientifique : la conscience résulterait d'instabilités gravitationnelles dans la structure de l'espace – temps, qui produiraient la réduction du paquet d'onde quantique dans de très petites protéines nommées microtubules à l'intérieur des neurones. Certains expérimentateurs recherchent par exemple des effets sur les microtubules quand on introduit des produits anesthésiants qui neutralisent la conscience chez les humains. Cette théorie hautement spéculative n'est pour le moment étayée par aucun résultat concret.

Il y a une raison de fond à ces échecs : les organismes humains sont très « bruyants », leurs molécules s'agitent, le cerveau est un milieu liquide et chaud qui crée un environnement propice à détruire les fragiles propriétés de superposition quantiques par effet de décohérence (voir ci-dessous). Certains travaux recherchent des mécanismes biologiques fondés sur l'intrication quantique, mais c'est toujours au niveau de quelques spins voisins dans une molécule. Si la conscience peut s'expliquer, c'est par les lois de la physique classique, de la « matière active » qui seules s'appliquent à l'échelle d'un organisme. Le « cerveau quantique » semble encore pour très longtemps aux marges les plus extrêmes de la connaissance scientifique.

Par ailleurs la non-localité quantique a engendré beaucoup d'interrogations. Certains philosophes ont vu dans le non-déterminisme de la mécanique quantique la justification de l'existence du libre arbitre et son rôle pour la conscience et la responsabilité. La tentation est toujours grande de faire dire à la mécanique quantique plus qu'elle ne dit réellement. Scubla n'hésite pas à rapprocher la

¹ Ce qui suit s'inspire des analyses parues dans le dossier « Quantum Frontiers » de *New Scientist* (numéro du 28 août 2021).

non-localité quantique et la non-localité du vivant, mais sans apporter aucun argument de démonstration. Il affirme :

« La mécanique quantique a puissamment contribué à rebattre les cartes [...] en s'affranchissant des notions de trajectoire et de déterminisme et en admettant implicitement une manière de finalité ; bref, en reconnaissant aux composantes de la matière des propriétés analogues à celles de la vie et de la conscience ».

Le texte suivant de Michel Le Bellac montre que cette affirmation, fondée sur une analogie plus que discutable, utilisant en particulier le théorème du libre arbitre, n'a aucune justification sur les bases de la mécanique quantique.

QU'EST CE QUE LA NON-LOCALITÉ QUANTIQUE ?

*Michel Le Bellac**

La mécanique quantique a la réputation d'être une théorie difficile d'accès, obscure et regorgeant de paradoxes. Cette réputation a encouragé des interprétations abusives de la part de vulgarisateurs, de philosophes... et même de nombre de physiciens. Un exemple est donné par l'article de Lucien Scubla « Note sur l'idée de la nature en physique », examiné dans le texte précédent de Michèle Leduc. Historiquement, les bases de la théorie quantique ont été finalisées par Niels Bohr et d'autres dans les années 1930, mais la vision qu'ont les physiciens de la mécanique quantique s'est considérablement enrichie depuis les années 1970, en particulier grâce au développement du concept d'intrication sur lequel nous reviendrons. Dans son argumentation, Scubla utilise des résultats récents, la non-localité quantique et le « théorème du libre arbitre » de Conway et Kochen, deux notions qui sont intimement reliées, mais nous verrons que cette utilisation est totalement inappropriée. Dans cet article, nous allons expliquer ce que recouvrent exactement la non-localité quantique et le théorème du libre arbitre. Pour introduire le sujet, il est instructif de revenir en 1935 et au célèbre « paradoxe EPR ».

* Professeur émérite de physique, Université Nice-Côte d'Azur

L'ARGUMENT EPR : EINSTEIN, PODOLSKY ET ROSEN

Des phénomènes nouveaux et surprenants se produisent si l'on considère des paires de particules quantiques et pas uniquement des particules individuelles. L'idée originale remonte à un article d'Albert Einstein, Boris Podolsky et Nathan Rosen, publié en 1935 et universellement connu par son acronyme EPR. Nous allons donner une version moderne simplifiée de cet article en utilisant dans notre argumentation des paires de photons polarisés, une configuration plus simple que celle envisagée originalement par EPR. Rappelons que la lumière est composée de particules appelées photons et que ces photons possèdent une propriété appelée polarisation, le fait que la lumière vibre dans une direction orthogonale à sa direction de propagation. On peut mettre en évidence ce phénomène en plaçant sur le trajet d'un rayon lumineux, supposé horizontal, un polaroïd disposé perpendiculairement à ce trajet. Ce polaroïd possède dans son plan un axe privilégié que nous allons orienter verticalement. Il laisse passer la lumière vibrant dans la direction de son axe, lumière que nous allons baptiser « polarisée verticalement » (V), et arrête une lumière vibrant dans la direction horizontale, « polarisée horizontalement » (H). Grâce à des dispositifs expérimentaux utilisant par exemple des cristaux optiquement non linéaires, on sait produire au laboratoire des paires de photons dans une configuration qui réalise concrètement celle envisagée par EPR : ce sont des paires de photons polarisés, qui, avec une probabilité de 50%, sont soit polarisés tous deux verticalement, soit tous deux horizontalement, des configurations que nous allons noter VV et HH respectivement. De façon précise, les photons sont dans une superposition quantique à parts égales d'états VV et HH , un énoncé qui possède une signification mathématique parfaitement bien définie. On dit que les deux photons sont *intriqués en polarisation*, un cas particulier du phénomène général d'*intrication quantique*. On s'arrange pour que les deux photons voyagent dans des directions opposées et qu'ils soient détectés par deux physiciens, appelés conventionnellement Alice et Bob, lesquels peuvent se trouver à très grande distance l'un de l'autre. La prédiction de la mécanique quantique est la suivante : si Alice mesure une polarisation V (H), alors Bob va aussi mesurer une polarisation V (H). Pour Einstein, ce résultat était difficile à admettre, parce qu'il semblait impliquer une communication à distance instantanée : le résultat d'Alice semble avoir une influence instantanée sur celui de Bob, alors que les deux physiciens sont arbitrairement éloignés, en contradiction avec la relativité restreinte d'Einstein qui interdit toute communication à une vitesse plus grande que celle de la lumière. Mais est-ce vraiment si étonnant ? Supposez que vous partez en avion à New York et qu'un de vos amis parte le même jour à Pékin.

Vous avez pris dans vos bagages une paire de gants, chaque gant se trouve dans un sac opaque, et vous donnez rendez-vous à votre ami à l'aéroport Charles de Gaulle. Vous lui remettez un des deux sacs sans l'ouvrir, effectuez votre vol et ouvrez votre sac une fois arrivé à New York. Il se trouve que votre sac contenait un gant droit. Vous savez alors que votre ami une fois arrivé à Pékin va trouver un gant gauche en ouvrant son propre sac. En fait la corrélation à distance vient de ce que des corrélations ont été introduites à la source entre les deux gants : vous ne savez pas si votre gant est droit ou gauche, mais vous savez que les deux gants ont des chiralités opposées. La mesure, dans ce cas l'observation du gant, révèle une réalité préexistante. Bien qu'il n'en ait jamais formalisé l'idée, Einstein pensait que, dans la configuration EPR, une information était transportée par les photons entre la source, dans ce cas le point de production de la paire de photons, et les détecteurs, et que des corrélations introduites à la source permettaient d'expliquer la violation apparente de la relativité. Einstein n'en concluait pas que la mécanique quantique était fautive, mais qu'elle était incomplète parce qu'elle ne prenait pas en compte l'information hypothétique transportée par les photons, ce que l'on appelle une hypothèse de « variables cachées. »

LIBRE ARBITRE DES PARTICULES ?

En dehors d'une réponse immédiate de Bohr, les choses sont restées en l'état et l'article EPR est tombé dans l'oubli jusqu'en 1965, année où le physicien nord-irlandais John Bell montre que l'idée de corrélations introduites à la source, ce que l'on appelle de façon équivalente des « variables cachées locales », est incompatible avec les prédictions de la mécanique quantique. Pour ce faire, Bell utilise des mesures de polarisation des photons non seulement suivant les axes vertical/horizontal comme dans l'article EPR, mais aussi suivant des angles intermédiaires variables. Si l'idée de corrélations introduites à la source est correcte, une certaine combinaison de mesures de polarisation doit toujours être inférieure à 2, ce que l'on appelle une inégalité de Bell, mais la mécanique quantique prédit que cette combinaison peut atteindre $2\sqrt{2} \approx 2,83$, ce qui constitue une violation de l'inégalité de Bell. Dans les années suivant la publication de l'article de Bell, une intense activité expérimentale, où s'est illustré le physicien français Alain Aspect, a permis de conclure que les inégalités de Bell étaient violées, ce qui confirmait de façon éclatante les prédictions de la mécanique quantique. En conséquence, on doit abandonner l'idée de corrélations introduites à la source, ou de variables cachées locales. Bien que très surprenant, ce résultat est une prédiction incontournable de la mécanique quantique. Les corrélations entre polarisations mises en évidence par Bell sont souvent

qualifiées de « corrélations non locales », mais il serait plus exact de parler de « corrélations qui ne peuvent être expliquées par aucun mécanisme probabiliste classique ». Plus généralement on déduit trois résultats fondamentaux, non indépendants, de la violation des inégalités de Bell.

1. Le résultat de la mesure d'une polarisation ne préexiste pas à la détermination expérimentale de sa valeur, et cela se généralise au cas de la mesure de toute quantité physique. Si l'on fait l'hypothèse contraire, il est facile de montrer que les inégalités de Bell ne peuvent pas être violées.

2. Il est impossible de décrire un processus quantique comme une suite de processus se déployant de façon continue dans l'espace et le temps. Autrement dit, la mécanique quantique ne décrit pas le déroulé des événements entre un état initial et un état final. Selon le physicien Nicolas Gisin « les corrélations non locales mises en évidence par la violation des inégalités de Bell se produisent en quelque sorte en dehors de l'espace-temps. »

3. Le résultat de la mesure de la polarisation d'un des photons, considérée comme un événement se produisant dans l'espace-temps – le clic d'un détecteur de photons – ne peut pas être déterminé uniquement par le passé de cet événement².

Ce dernier énoncé constitue le théorème du libre arbitre de John Conway et Simon Kochen (2009) : si les expérimentateurs ont le libre choix de leurs axes de mesure de la polarisation, alors le résultat de la mesure ne peut pas être déterminé par l'histoire qui a précédé cet événement. En fait, Conway et Kochen n'ont fait que confirmer un résultat bien connu de Bell dès les années 1980 en y ajoutant un vernis médiatique.

Mais ce théorème ne permet en aucun cas de conclure que les particules quantiques disposent de leur libre arbitre. L'erreur fondamentale de Scubla est de considérer la non-localité comme une propriété intrinsèque de particules quantiques autonomes, transportant avec elles toute l'information nécessaire pour prévoir les résultats des mesures, ce qui est typique d'une vision de variables cachées. Or cela va à l'encontre des prescriptions mêmes de Bohr, selon lesquelles on ne peut pas dissocier les particules quantiques de l'appareillage expérimental utilisé pour les observer³. La non-localité ne peut se

² Dans un langage relativiste précis, un événement qui se produit en un point de l'espace-temps ne peut pas être déterminé uniquement par le cône de lumière passé de ce point.

³ Cette observation est à la base de la réponse Bohr à l'article EPR : les auteurs n'ont pas pris en compte le fait que « les conditions expérimentales

manifester que lorsque des mesures ont été faites et que les résultats enregistrés par des détecteurs éloignés ont été rassemblés de façon à mettre en évidence des corrélations non locales, ou plus exactement des corrélations qui n'ont pas d'explication classique. Sans événements dûment enregistrés par des détecteurs⁴, il n'y a pas de non-localité ! C'est donc *l'ensemble* particules + appareils de mesure qui est soumis au théorème du libre arbitre. On n'insistera jamais assez sur le fait que dans la version la plus élaborée de la mécanique quantique, la théorie des champs quantiques relativistes, les interactions des particules quantiques sont parfaitement locales. En revanche, ce qui est exact est que toute théorie de variables cachées reproduisant la mécanique quantique contient des interactions non locales, des interactions instantanées à distance. Mais une telle théorie n'a pas bonne presse chez la plupart des physiciens : en effet, contrairement à la mécanique quantique conventionnelle, elle ne possède pas de généralisation satisfaisante compatible avec la relativité restreinte, ce qui constitue un défaut rédhibitoire.

LE PROBLÈME DE LA MESURE QUANTIQUE

Est-ce à dire que nous n'avons rien balayé sous le tapis ? La mécanique quantique telle que définie par Bohr est une théorie cohérente et en accord parfait avec l'expérience. Que demander de plus ? En fait nous avons vu l'importance du processus de mesure d'un objet quantique, la mesure de la polarisation des photons dans l'exemple EPR. Ces mesures se font grâce à un dispositif expérimental décrit par la physique classique, mais après tout, un détecteur de photons, par exemple, est formé d'atomes et devrait être décrit, en dernière analyse, par la physique quantique. Pourquoi peut-on ignorer le caractère quantique du détecteur et, plus problématique encore, pourquoi la mesure aurait-elle un résultat ? Prenons l'exemple de la paire de photons polarisés. La paire est dans un état de superposition d'états VV et HH , mais la mesure donne soit VV , soit HH . Si ces polarisations avaient une valeur avant la mesure, alors on pourrait simplement avoir recours aux probabilités : dans l'exemple des gants, nous avons une probabilité de 50 % d'avoir un gant

constituent une composante intrinsèque de tout phénomène auquel on peut attribuer le qualificatif de réalité physique », et l'on ne peut pas raisonner comme si le système quantique possédait une réalité indépendante de ces conditions expérimentales. C'est pourquoi Bohr peut conclure que l'affirmation EPR selon laquelle la mécanique quantique serait incomplète n'est pas justifiée.

⁴ Il est utile de rappeler la citation de John Wheeler : « un événement ne mérite ce qualificatif que lorsqu'il a été dûment enregistré ».

droit à New York et un gant gauche à Pékin, et une probabilité de 50 % pour la configuration inverse. L'observation des gants choisit entre ces deux configurations, mais elle ne fait que révéler une réalité préexistante. Ce n'est pas le cas en physique quantique, où les polarisations des deux photons n'existent pas tant qu'elles n'ont pas été mesurées. Comment une superposition des états VV et HH peut-elle donner un résultat unique ? C'est ce que l'on appelle le *problème de la mesure en mécanique quantique*, problème auquel nous n'avons pas pour l'instant de solution.

Les développements qui précèdent reposent sur un concept dont l'importance est capitale en physique quantique moderne, le concept d'intrication. Dans un système de deux particules quantiques intriquées comme la paire de photons intriqués en polarisation dans l'état superposition VV et HH , l'information sur l'état est distribuée sur *l'ensemble* des deux particules et on ne peut pas les considérer individuellement, même si elles sont arbitrairement éloignées. Les corrélations entre les deux particules peuvent s'étendre sur des distances arbitrairement grandes. Malgré tout, l'intrication ne permet pas de communiquer à une vitesse supérieure à celle de la lumière et elle ne viole pas la relativité. La mécanique quantique, nous l'avons vu, reste une théorie d'interactions locales.

SUPERPOSITIONS QUANTIQUES ET DÉCOHÉRENCE

Les développements actuels de la physique quantique portent principalement sur la construction d'objets quantiques de plus en plus « gros ». On est loin du paradigme ancien qui voulait que la mécanique quantique traite exclusivement du microscopique ! Pour prouver le comportement quantique d'un objet, il faut que l'on puisse mettre en évidence des états de superposition quantique en observant par exemple des interférences, comme dans une expérience de fentes d'Young avec des photons uniques. On ne connaît pas de limite théorique à la taille d'un objet quantique, mais il existe une difficulté pratique. Plus un objet quantique est gros, et plus il a tendance à interagir avec son environnement, ce qui détruit les superpositions quantiques. Ce phénomène est appelé la décohérence⁵, et il se combat en isolant du mieux possible l'objet quantique de son environnement, par exemple en le portant à des températures voisines du zéro absolu afin de restreindre les fluctuations thermiques. Si l'on

⁵ Certains physiciens ont avancé l'idée que la décohérence permettrait de résoudre le problème de la mesure quantique. Bien qu'elle joue certainement un rôle important dans le processus de mesure, la décohérence ne peut en aucun cas expliquer l'apparition d'un résultat unique.

n'est pas capable d'isoler suffisamment l'objet, alors les superpositions sont détruites au bout d'un temps si court qu'elles ne sont pas observables. C'est le cas dans les milieux biologiques comme le cerveau dont l'environnement se trouve par définition à la température ordinaire, une température bien trop élevée pour éviter une décohérence instantanée. Il faut prendre énormément de précautions, par exemple opérer dans un vide très poussé, pour observer des phénomènes d'interférences avec des molécules contenant jusqu'à 2000 atomes et dont la taille est comparable à celle d'une petite protéine. De telles interférences pourraient être observées avec des virus, voire des objets vivants comme des tardigrades, pourvu que l'on puisse les isoler suffisamment de leur environnement.

En résumé, si l'on voulait caractériser l'aspect le plus déroutant de la mécanique quantique, bien plus que l'indéterminisme ou la possibilité pour une particule de se trouver – en un certain sens – en plusieurs endroits à la fois, ce serait le fait que la mesure quantique ne révèle pas une réalité préexistante. Dans une paire de photons telle que celle envisagée ici pour introduire le phénomène EPR, chaque photon individuel n'a aucune polarisation avant la mesure. C'est le processus de mesure qui crée la valeur observée. En ce sens une phrase souvent rencontrée « la mesure perturbe l'état du système » est particulièrement malheureuse. En effet, la mesure de la polarisation d'un photon dans une paire EPR ne peut pas perturber celle-ci car elle n'existe pas. La deuxième observation est que la mécanique quantique est aujourd'hui une théorie incomplète, qui n'est pas auto-suffisante car elle ne rend pas compte du processus de mesure. Cependant, il n'existe pas à ce jour d'ambiguïté dans sa mise en œuvre pour un problème de physique concret, et en ce sens elle est parfaitement cohérente. En particulier, j'ai montré que la non-localité quantique, le théorème du libre arbitre ou la décohérence ont une signification physique parfaitement bien définie et ne peuvent en aucun cas être extrapolées pour servir de caution à des options philosophiques comme la finalité, une extrapolation à laquelle se livre Scubla dans son article.

Remerciements. Nous remercions Jean-Michel Raimond, Alain Omont, Olivier Darrigol et Jean-Marc Lévy-Leblond pour leurs commentaires et suggestions.