

EINSTEIN-BOHR : LE GRAND DÉBAT QUANTIQUE

Etienne Klein

La physique et la philosophie sont deux disciplines aujourd'hui bien séparées, au moins dans les cursus universitaires. Cette indépendance relative ne semblant guère affecter leurs progressions respectives, il n'y a pas lieu de la remettre en cause. Il peut toutefois arriver qu'elle soit intellectuellement frustrante, ou même qu'elle ait des conséquences néfastes pour l'une et l'autre des deux disciplines. C'est alors comme si la pensée tout entière passait à côté de quelque chose d'important, par exemple une question inédite, une donnée pertinence, ou une nouvelle sorte d'argument. Il existe notamment des situations dans lesquelles la physique permet de faire des « découvertes philosophiques négatives », pour reprendre l'expression du philosophe Maurice Merleau-Ponty¹. Que faut-il entendre par là ? Que certains de ses résultats peuvent modifier les termes en lesquels certaines questions philosophiques se posent, apporter des contraintes, et ainsi s'inviter dans des débats qui lui sont *a priori* extérieurs. Par exemple, il me semble qu'il est devenu difficile de traiter de la question du temps comme si la théorie de la relativité d'Einstein n'avait pas « fait ses preuves ». De la même façon, il me semblerait intellectuellement discutable de prétendre traiter philosophiquement de la question du « réel » sans tenir compte des leçons de la physique quantique, qui sont, en la matière, très contraignantes.

Deux grands pionniers de la physique quantiques

Einstein et Bohr ont tous les deux eu un rôle séminal, et de première importance, dans l'émergence de la physique quantique. Respectueux de la chronologie, je commencerai par évoquer le cas d'Einstein et sa première contribution à ce qui va devenir la physique quantique. Celle-ci prit la forme d'un article daté du 17 mars 1905, le premier d'une période qui va devenir son « année miraculeuse », celle où il va notamment élaborer la théorie de la relativité restreinte. Cet article s'intitule « Sur un point de vue heuristique concernant la production et la transformation de lumière ». Dans cet article, le jeune Einstein – il n'a que 26 ans - fait l'hypothèse que la lumière n'est pas un phénomène aussi continu qu'on a pu le penser, car elle est véhiculée par des « quanta », c'est-à-dire des sortes de grains d'énergie

¹ Maurice Merleau-Ponty, *La Nature. Notes – Cours du Collège de France*, Paris, Seuil, 1995, p. 68.

lumineuse qui seront baptisés « photons » vingt ans plus tard. Cela lui permet d'expliquer les caractéristiques d'un phénomène physique particulier, l'effet photoélectrique, qui avait été découvert par Heinrich Hertz en 1887 : un matériau conducteur, par exemple un métal, lorsqu'il est illuminé par une lumière bleue, émet un flux d'électrons, mais ce phénomène ne se produit plus si la lumière qui l'éclaire est rouge, même si celle-ci est très intense. Comment interpréter cette différence radicale entre l'effet d'une lumière bleue et celui d'une lumière rouge, dès lors qu'elles sont de même nature, c'est-à-dire composées d'ondes électromagnétiques ne se distinguant que par leurs fréquences ?

Einstein reprend en fait certains arguments développés en 1900 par Max Planck à propos de la quantification des échanges d'énergie entre la lumière et la matière et comprend deux choses. La première est que la lumière a, par certains côtés, une structure corpusculaire et non pas ondulatoire, au sens où elle est structurée en petits paquets d'énergie, les « quanta ». La seconde est que l'énergie transportée par ces quanta dépend de la couleur de la lumière, ou, pour être plus précis, de sa fréquence : les quanta présents au sein de la lumière bleue contiennent plus d'énergie que ceux présent dans de la lumière rouge, car leur fréquence est plus élevée.

Comment se comprend alors l'effet photoélectrique ? Lorsqu'il arrive en contact avec le métal, un quantum de lumière transmet une partie ou la totalité de son énergie à un électron emprisonné dans le métal, qui est ainsi libéré et mis en mouvement. Bien sûr, cela ne peut se faire qu'à la condition que l'énergie du quantum de lumière soit suffisante. C'est le cas pour les quanta d'une lumière bleue, mais pas pour ceux d'une lumière rouge.

L'hypothèse des photons explique donc pourquoi, au-dessous d'une certaine fréquence de rayonnement, aucun électron n'est émis. Elle constituera l'un des points de départ de la physique quantique. C'est d'ailleurs pour ce travail décisif, la quantification du rayonnement lumineux, qu'Einstein se verra attribuer le prix Nobel de physique en 1921.

Niels Bohr, lui, va poursuivre ce travail en 1913, en faisant intervenir la quantification non pas seulement dans la lumière, mais aussi dans la matière elle-même, c'est-à-dire dans l'atome, en quantifiant ses niveaux d'énergie, c'est-à-dire en montrant qu'un électron, dans un atome, a une énergie qui ne peut pas prendre une valeur quelconque. Ce que Niels Bohr propose, c'est en somme un modèle révolutionnaire de l'atome basé sur deux hypothèses audacieuses, qui sortent complètement du cadre de la physique classique, c'est-à-dire de la physique « d'avant ». De fait, Niels Bohr est le premier physicien à comprendre que le comportement de l'atome ne deviendra intelligible qu'au prix d'une physique radicalement nouvelle.

La première hypothèse faite par Bohr consiste à dire que les électrons ne peuvent pas se trouver sur n'importe quelle orbite, sur n'importe quelle trajectoire autour du noyau. Seules certaines sont autorisées, toutes les autres sont interdites. À chacune des orbites autorisées correspond une énergie bien déterminée, qui la caractérise. Un électron dans un atome ne peut donc pas avoir n'importe quelle énergie : son énergie est « quantifiée ».

La seconde hypothèse concerne le rayonnement émis par l'atome. Niels Bohr suppose que lorsqu'un électron tourne sur son orbite (autorisée), il n'émet pas de lumière, contrairement à ce que prévoient les lois classiques. Mais l'électron a la possibilité de sauter brutalement d'une orbite à une autre, d'énergie moindre. Lorsqu'il effectue un tel saut, l'électron émet un grain de lumière, autrement dit un photon, qui emporte la différence d'énergie entre l'orbite de départ et l'orbite d'arrivée. Dans ce processus, une fraction de l'énergie de l'électron se métamorphose donc soudainement en lumière...

Les orbites autorisées pour les électrons n'étant pas quelconques, leurs énergies respectives se répartissent sur une échelle dont les barreaux sont disposés de façon irrégulière. En conséquence, le spectre du rayonnement lumineux émis par un atome n'est pas continu. Il ne contient pas toutes les fréquences, uniquement celles qui correspondent au passage d'un barreau de l'échelle à un autre. Il est donc constitué de raies particulières, qui correspondent aux transitions de l'électron depuis une orbite autorisée vers une autre orbite autorisée. Ces raies forment une sorte de peigne aux dents irrégulières : on dit d'un tel spectre qu'il est « discret » (par opposition à « continu »).

Le modèle de Bohr remporte immédiatement un vaste succès, notamment parce qu'il rend compte de la structure en raies, de plus en plus finement mesurée par les expérimentateurs, du spectre de la lumière émise par les atomes. Mais il manque de cohérence, ainsi que les physiciens le comprendront plus tard. Car, contrairement à ce qu'il affirme, on découvre que les électrons n'ont pas de trajectoire bien définie au sein de l'atome. On ne saurait donc leur assigner une orbite au sens propre du terme. Ils semblent plutôt délocalisés dans l'espace. Peu à peu, au cours des années 1920, les physiciens ne conserveront finalement du modèle de Bohr qu'une idée : les électrons d'un atome ne peuvent se trouver que dans certains états particuliers ; ces états sont caractérisés par leur énergie, et non par une trajectoire au sens classique du terme. Il n'empêche : pour son travail, Niels Bohr reçoit le prix Nobel de physique, un an après Einstein.

Einstein et Bohr sont donc bien, à poids égal, deux éminents pères fondateurs de la physique. Mais dire cela, c'est ne faire allusion qu'au premier versant de l'histoire. Or il y a un second versant à l'histoire, peut être moins connu que le premier : c'est que dès la fin

des années 1920, Einstein s'est (amicalement) opposé à Niels Bohr à propos de l'interprétation à donner à la physique quantique. La question posée était : qu'est-ce que la physique quantique, qui semble si bien fonctionner, nous permet de dire du monde ? Est-elle un aboutissement, ou simplement une étape décisive de l'évolution de la physique, une étape décisive mais dépassable ?

La base du formalisme quantique

La physique quantique repose sur un arsenal mathématique extrêmement rigoureux, ce qu'on appelle un formalisme. Est-il possible d'en présenter la quintessence ? Je pense que oui. En tout cas, je vais essayer. Toute la question sera ensuite de savoir sur quoi ce formalisme porte, de quelle sorte de réalité il nous parle et c'est sur la réponse à apporter à cette question qu'Einstein et Bohr vont s'opposer.

Nous savons d'expérience qu'il existe plusieurs types d'ondes, des ondes acoustiques, des ondes électromagnétiques, etc., et nous savons aussi que ces différents types d'ondes possèdent une propriété qui leur est commune à toutes, indépendamment de la matière de leur support : elles sont capables de s'ajouter les unes aux autres si elles sont du même type, elles sont capables de se superposer. Cela signifie que la somme de deux ondes est encore une onde. Cette propriété formelle, qu'on appelle le « principe de superposition », traduit en quelque sorte la quintessence du concept d'onde. L'idée essentielle, fondamentale, de la physique quantique a été de reprendre cette idée et de la généraliser en lui donnant une portée beaucoup plus vaste : le principe de superposition devra s'appliquer non seulement aux ondes, ce qu'il fait déjà, mais aussi à tous les autres objets physiques, de quelque nature qu'ils soient.

Qu'est-ce que l'état d'une particule ?

Un système physique, par exemple une particule, se définit par un certain nombre de caractéristiques qui sont identiques pour tous les systèmes du même type. C'est ainsi que tous les électrons, où qu'ils soient et dans quelque environnement qu'ils se trouvent, ont rigoureusement la même masse et la même charge électrique. Mais, en plus de ces caractéristiques qui sont les mêmes pour tous les électrons et qui d'ailleurs les définissent, les électrons se voient attribuer des quantités qui, elles, peuvent varier de l'un à l'autre. Ce sont par exemple la position ou la vitesse : tous les électrons du monde ne sont pas au même endroit, ni n'ont la même vitesse. L'ensemble de ces quantités forme en physique classique ce qu'on appelle « l'état » de la particule. La question est : comment doit-on représenter l'équivalent de cet état en physique quantique ? La réponse est : on décide de

représenter l'état de n'importe quel système physique par des entités, notées pour le moment a, b, c, \dots , dont nous n'exigerons que deux propriétés :

1) La première est que l'on sache ajouter ces entités entre elles, de façon à obtenir une entité du même type. Autrement dit, si a et b sont deux états possibles d'un certain système, alors l'état $(a + b)$ est *lui aussi* un état possible de ce système. Nous ne faisons ainsi que généraliser le principe de superposition en l'appliquant non pas seulement aux ondes, mais aussi à n'importe quel système physique. La règle de l'addition devient en quelque sorte universelle ;

2) La seconde est que l'on sache multiplier ces entités par un nombre quelconque.

En mathématiques, les entités qui satisfont à ces deux propriétés s'appellent des « vecteurs ». Et l'ensemble qu'ils forment s'appelle – ce qui n'est pas une grosse surprise – un « espace vectoriel ». Désormais, nous appellerons donc « vecteurs d'état » les entités a, b, c qui représentent les divers états possibles des systèmes physiques. Ces vecteurs d'état sont en somme ce par quoi le formalisme quantique choisit de représenter les états physiques des systèmes. Ils sont des fonctions de l'espace et du temps.

Cette description des états physiques par des vecteurs d'état obéissant au principe de superposition est l'idée *fondamentale* de la physique quantique. En somme, la physique quantique exige l'addition, l'addition pour tout le monde. Il est remarquable qu'un postulat aussi simple ait conduit à des progrès aussi considérables dans le domaine de la physique. Grâce à lui, de très nombreux phénomènes incompréhensibles en physique classique ont pu être décrits de façon élégante et synthétique. Par exemple, si la liaison chimique existe, c'est (pour dire les choses rapidement) parce qu'un électron peut être localisé *à la fois* sur plusieurs atomes, comme « suspendu » entre plusieurs positions, conformément à ce qu'exige le principe de superposition. De la même façon, dans une molécule diatomique, certains électrons, dits de valence, sont *à la fois* du côté gauche et du côté droit de la molécule. Cela semble saugrenu, mais c'est pourtant bien cela qui se passe, une sorte d'alternance gauche-droite incessante, à moins que ce ne soit une cohabitation permanente. Mais - et c'est un fait tout aussi singulier - ce sont les conséquences du principe de superposition qui ont engendré les difficultés d'interprétation de la physique quantique et provoqué des réticences philosophiques à l'encontre de cette dernière.

On devine en partie l'origine de ces problèmes. Le formalisme de la physique quantique opère au sein d'espaces abstraits, des espaces vectoriels dits « de Hilbert » qui sont fort différents, et structurellement fort éloignés de l'espace physique où ont lieu les événements que ce formalisme prétend décrire. Il y a en somme une émancipation vis-à-vis de l'espace physique ordinaire, qui instaure une distance entre la représentation des phénomènes et les

phénomènes eux-mêmes, distance au sein de laquelle viennent s'engouffrer toutes sortes de questionnements inédits, notamment sur le lien qu'il y a - ou qu'il n'y a pas - entre le réel et sa représentation.

De plus, comme l'ont vite remarqué Einstein et Schrödinger (dès 1935), le principe de superposition devient très dérangent si on s'amuse à l'appliquer à des objets « usuels », c'est-à-dire à des objets observables à notre échelle. C'est pourquoi, dans le but de rendre manifestes les aspects paradoxaux de ce principe fondateur de la physique quantique, ils inventèrent chacun une expérience de pensée. « Le chat de Schrödinger » pour Schrödinger, mais avant lui, Einstein avait pris l'exemple (aujourd'hui oublié) d'un baril de poudre en état d'instabilité chimique et couplé à un atome radioactif, de telle sorte que la désintégration de l'atome libère une énergie suffisante pour déclencher l'explosion de la poudre. L'instant de la désintégration ne pouvant être prédit que de façon probabiliste, le vecteur d'état de l'atome s'écrit comme la superposition de l'état *atome désintégré* et de l'état *atome non désintégré*. Quant au vecteur d'état du baril de poudre couplé à l'atome, il s'écrit lui aussi sous la forme d'une superposition, cette fois des états *baril explosé* et *baril non encore explosé*. Or, font remarquer d'une même voix Einstein et Schrödinger, de tels états superposés ne s'observent jamais dans le monde macroscopique auquel appartiennent indéniablement les barils de poudre : soit ils ont déjà explosé complètement, soit ils n'ont pas encore explosé du tout.

Qu'est-ce qu'un état « superposé » ?

Soit une particule dans un état superposé, disons $a + b$, a représentant l'état d'une particule qui est ici, b l'état de la même particule qui est là. Que dit l'interprétation dite « de Copenhague » (car proposée par Niels Bohr qui habitait Copenhague où il accueillait de nombreux jeunes physiciens) de la physique quantique à ce propos ? Qui si on fait une mesure de la position de la particule qui est dans l'état $a + b$, on a une chance sur deux de la trouver ici, et une chance sur deux de la trouver là. En clair, la physique quantique n'offre donc rien de mieux que des probabilités. D'une façon générale, elle indique seulement que si l'on effectue tel ou tel type de mesure, on a telle ou telle probabilité d'obtenir tel ou tel résultat. Et surtout, point capital, tant que la mesure n'est pas faite, la grandeur censée quantifier la propriété physique dont il est question n'est pas strictement définie si le vecteur d'état de la particule s'écrit comme la somme de plusieurs états.

La réduction du paquet d'ondes

Qu'est-ce que cela signifie ? Que la superposition quantique a été détruite par l'opération de mesure. La représentation mathématique de la particule a été modifiée par l'action de l'appareillage : avant, c'était $a + b$, après c'est a , ou bien c'est b ; d'une somme de deux termes, on est passé à un seul terme. La mesure a en quelque sorte contraint le vecteur d'état à perdre l'un de ses deux termes, de façon aléatoire. On dit qu'il y a eu « réduction du paquet d'ondes », reprenant ainsi une expression qui fut utilisée pour la première fois par Werner Heisenberg, en 1927.

Tout se passe comme si la mesure avait obligé la particule à « prendre position », au sens propre comme au sens figuré : au sens propre, car elle se localise soudainement dans l'espace, et au sens figuré, car ce faisant, elle sort de son ambivalence, fait une sorte de choix entre les divers possibilités qui s'offraient à elle.

Le vecteur d'état d'avant la mesure permet donc de connaître *a priori* les différents résultats de mesure possibles (et aussi la probabilité de chacun d'eux). Il renferme toutes les potentialités du système, dont une seule s'actualise - de façon aléatoire - lors d'une expérience donnée.

Si c'est dans l'état a que la particule apparaît après la mesure, la tentation est grande - irrésistible même - d'imaginer que son état était déjà celui-là avant la mesure. Cela revient à considérer que la mesure n'aurait rien fait d'autre que révéler une situation déjà existante. Elle aurait simplement enregistré un état de fait. Mais si on se forme une telle image des choses, on tombe sur des contradictions terribles, que je ne peux pas détailler ici.

Plus généralement, on ne peut pas prétendre qu'une particule détectée dans un état donné se trouvait déjà dans cet état juste avant la mesure, et donc qu'elle possédait la propriété mesurée antérieurement à l'opération de mesure. Il faut admettre que, lorsqu'une particule est représentée par un vecteur d'état qui s'écrit sous la forme d'une somme de plusieurs termes, ses propriétés physiques sont indéterminées au sens où l'on ne peut pas leur attribuer une valeur bien définie qui soit certaine. Le vecteur d'état d'avant la mesure contient seulement toutes les possibilités du système et il ne donne pas davantage que la probabilité que telle ou telle valeur soit sélectionnée au hasard à l'issue d'une mesure. Dès lors, comment parler des particules comme de « choses en soi » s'il faut faire des mesures sur elles pour que leurs propriétés soient bien définies ? A-t-on encore le droit de leur attribuer une réalité physique autonome, indépendante de l'instrument d'observation ? On voit que le problème de la mesure en physique quantique incite à s'interroger à propos de ce que l'on entend au juste par *réalité*. Et c'est là que les affaires sérieuses commencent et que les controverses s'amorcent.

La physique à la croisée des chemins

Revenons à Einstein et Bohr. Ils se rencontrent pour la première fois en mai 1920, en Hollande, chez Paul Ehrenfest, un ami très proche d'Einstein. Einstein est immédiatement séduit par le physicien danois. Il avoue par écrit à Ehrenfest : « C'est vraiment un homme de génie. [...] J'ai entièrement confiance en sa façon de penser. [...] Je suis amoureux de lui autant que toi. »² Mais au cours des années suivantes, qui constituent une période charnière dans l'histoire de la physique, des nuances apparaissent entre les deux hommes : Einstein n'aura plus tout à fait confiance en la façon de penser de Bohr. Et réciproquement.

Dès 1925, plusieurs physiciens perçoivent que la physique du monde microscopique, c'est-à-dire de l'atome, des particules, de la lumière, est arrivée à la croisée des chemins : soit elle parvient à retrouver le cadre d'interprétation de la physique classique, qui n'attribue pas de rôle fondamental à l'opération de mesure, soit elle quitte définitivement ce cadre. Ehrenfest, lui, a une intuition : il devine que cette grande affaire, celle de la « bonne » interprétation de la physique quantique, va se jouer entre ces deux monstres physiciens que sont Einstein et Bohr. Et cette intuition ne va pas tarder à se révéler juste.

Le congrès Solvay de 1927 et l'émergence de l'interprétation de Copenhague

En 1927, les plus grands physiciens du moment se retrouvent à Bruxelles, au cinquième « congrès Solvay », financé et organisé par un industriel belge qui avait fait fortune dans l'industrie chimique. Ainsi que l'avait prévu Ehrenfest, Einstein et Bohr s'affrontent pour la première fois à propos du concept de réalité physique et de ce que l'on peut en dire. Ehrenfest pressent que les arguments de l'un et de l'autre demeureront dans l'histoire. Il assiste à toutes leurs discussions et prend des photos des deux hommes en pleine discussion, parfois en pleine méditation, photos dont certaines deviendront célèbres. Et pendant les exposés de Bohr, Einstein et Ehrenfest (qui étaient intellectuellement et philosophiquement complices) se font passer des petits mots moqueurs à propos des arguments qui constitueront l'interprétation standard de la physique quantique, aussi appelée interprétation « de Copenhague » comme je l'ai rappelé tout à l'heure : « Ne ris pas !!, écrit par exemple Ehrenfest à son ami. Au purgatoire il y a une classe spéciale

² Lettre d'Einstein à Ehrenfest du 4 mai 1920.

réservée aux « professeurs de physique quantique » dans laquelle ils ont droit à dix heures par jour de cours de physique classique³. »

Les discussions se poursuivirent par la suite, notamment à l'occasion des congrès Solvay ultérieurs. Mais dans les années qui suivirent le congrès Solvay de 1930, il n'y eut guère de contacts directs entre Einstein et Bohr. Une partie de l'explication tient dans le fait que leur agent de liaison le plus efficace et le plus précieux, Paul Ehrenfest, mit fin à ses jours en septembre 1933. Dans l'hommage qu'il lui rendit, Einstein évoqua la lutte intérieure de son ami pour appréhender la physique quantique et « la difficulté croissante de s'adapter à de nouvelles pensées qui assaillent toujours l'homme une fois passée la cinquantaine. Je ne sais pas combien de lecteurs de ces lignes seront capables de comprendre pleinement cette tragédie⁴ ».

Nombreux furent ceux qui, en lisant ces paroles d'Einstein, les prirent pour une description de sa propre situation, de son rapport personnel à la physique quantique.

Un débat philosophique autour du concept de réalité

Qu'est-ce qui oppose au juste Bohr et le père de la relativité ? Einstein considère que la théorie quantique est une théorie ingénieuse, et il loue sans la moindre réserve son efficacité opératoire et sa portée pratique. Mais, selon lui, une théorie physique ne doit pas être jugée à l'aune de sa seule efficacité : elle doit également dépeindre les structures intimes du *réel*, tel qu'il existe indépendamment de nous. Or à ses yeux, la physique quantique ne fait pas bien cela. Il formule essentiellement deux objections à son endroit :

1) Tout d'abord, cette théorie stipule que, connaissant l'état d'un système physique, on ne peut généralement pas prédire le résultat d'une mesure, mais seulement calculer les probabilités d'obtenir tel ou tel résultat : parmi tous les résultats possibles *a priori*, un seul est sélectionné, au hasard, par l'opération de mesure. Or, aux yeux d'Einstein, une bonne théorie physique se doit d'éliminer le hasard, sinon de ses constructions, du moins de ses principes. Dieu, pense-t-il, ne saurait s'amuser à « jouer aux dés ».

2) Ensuite, Einstein tient au réalisme « ordinaire » des physiciens : la physique se doit de défendre l'idée d'un monde réel dont les plus minuscules parcelles existent objectivement, au sens où existent les cailloux et les chaises, que nous les observions ou non. Pour Einstein, il y a des faits, des événements, qui sont réels : ils ne sont pas seulement des

³ Cet échange de mots, retrouvé dans les papiers d'Ehrenfest, est reproduit dans Albert Einstein, *Œuvres choisies*, Seuil/CNRS (sous la direction de F. Balibar), 1989-1991, vol. 1, p. 212.

« réalités pour nous », mais bien d'authentiques « réalités tout court », qui doivent avoir une contrepartie dans toute théorie qui se prétend complète. Or ce réalisme-là est laissé de côté par la physique quantique. Dès lors, ce qu'Einstein aimerait pouvoir faire, c'est démontrer qu'il existe des « éléments de réalité » que cette théorie n'appréhende pas. Ce serait la preuve que la physique quantique est « incomplète », qu'elle ne nous dit pas tout ce que nous devrions pouvoir savoir de la réalité physique. Je vous propose, pour comprendre ce point qui est fondamental, une analogie : imaginez que vous trouviez un livre dans une bibliothèque publique et que, au moment où vous voulez l'emprunter, vous vous entendiez dire par le bibliothécaire que d'après le catalogue, la bibliothèque n'a aucune trace de cet ouvrage. Comme le livre porte toutes les références nécessaires indiquant qu'il fait vraiment partie du fond de la bibliothèque, la conclusion à laquelle vous arriverez rapidement est que le catalogue est incomplet.

De son côté, Bohr répugne à considérer qu'il existe une réalité indépendante de l'appareil de mesure, car il lui semble impossible d'obtenir une séparation nette entre le comportement des particules et leur interaction avec les appareils qui déterminent leurs propriétés. De sorte que, selon lui, ce qu'une théorie physique peut prétendre décrire, ce sont seulement des phénomènes incluant dans leur définition le contexte expérimental qui les rend manifestes, et non une réalité prétendument objective. Pour reprendre l'exemple du livre dans la bibliothèque que j'ai évoqué pour illustrer la position d'Einstein, dans ce cas, la position de Bohr serait de faire dire au bibliothécaire que le catalogue est bel et bien complet et que le livre que vous disiez avoir vu dans les rayonnages n'était qu'un pur produit de votre imagination. En somme, vous avez eu une hallucination à propos du réel, vous avez abusivement cru à l'existence d'une chose qui n'existe pas.

Le lumineux article EPR

Ce débat entre Einstein et Bohr s'est poursuivi jusqu'à la mort d'Einstein, en 1955 (Bohr, lui, est mort en 1962), mais il s'est surtout concentré en 1935 sur un article de seulement quatre pages signé par Einstein et deux collaborateurs, Boris Podolsky et Nathan Rosen. À ce moment-là, Einstein vient de s'installer à Princeton, où il passera le reste de son existence. L'Institut des Etudes Avancées de Princeton, aux yeux de Robert Oppenheimer qui y passa plusieurs années, c'était « un asile de fous empli de sommités

⁴ Albert Einstein, *Out of my later Years*, New York, Philosophical Library, 1950, p. 238.

solipsistes resplendissant chacune dans sa désolation impuissante⁵ ». Lorsqu'Einstein arriva dans cet endroit en octobre 1933, on lui demanda de quel matériel il aurait besoin : « Un bureau ou une table, une chaise, du papier et des crayons, répondit-il, et aussi une grande corbeille à papiers pour que je puisse y jeter toute mes erreurs⁶ ». Il faut dire que le père de la relativité se sentait de moins en moins en phase avec la physique de son temps. À cinquante-quatre ans, il avait conscience qu'on le considérait comme une relique d'une époque révolue, qui refusait de vivre sereinement avec la physique quantique, ou en était incapable. Ce qui n'empêchait pas qu'il y avait toujours de jeunes physiciens qui étaient fort désireux de collaborer avec Einstein. L'un était justement Nathan Rosen, âgé de vingt-cinq ans seulement, un New-Yorker qui était venu du MIT pour devenir son assistant. Quelques mois auparavant, le russe Boris Podolski, trente-neuf ans, avait lui aussi rejoint Princeton. Il avait rencontré Einstein pour la première fois à Caltech en 1931 et ils avaient publié un article ensemble.

C'est Einstein qui eut l'idée qui sera développée dans cet article dit « EPR » d'après les initiales de ses trois auteurs. Podolski se vit attribuer la tâche de rédiger l'article, tandis que Rosen effectuerait la plupart des calculs mathématiques, au demeurant fort simples. L'article EPR est intitulé « La description quantique de la réalité physique peut-elle être considérée comme complète ? ». Les trois auteurs répondent : Non ! à cette question. L'article est publié le 15 mai 1935 dans la *Physical Review*, mais dès le 4 mai, le *New York Times* publie un article sous la manchette accrocheuse suivante : « Einstein attaque la théorie des quanta ! », provoquant la fureur d'Einstein qui exige du journal qu'il publie la déclaration suivante : « J'ai pour principe invariable de ne débattre de questions scientifiques que dans le forum approprié, et je désapprouve la publication prématurée de toute annonce en la matière dans la presse séculière⁷. »

Mais revenons au fond : que contient l'article EPR ? Einstein et ses coauteurs y présentent pour la première fois une situation dans laquelle la mécanique quantique prédit des corrélations particulièrement fortes entre deux particules éloignées l'une de l'autre, corrélations qui apparaissent si ces deux particules sont préparées dans un état physique autorisé par la théorie mais dont les propriétés sont surprenantes (du moins pour quelqu'un

⁵ Alice Kimball Smith & Charles Weiner, *Robert Oppenheimer : Letters and Recollections*, Cambridge, Harvard University Press, 1980, p. 190. Lettre de Robert Oppenheimer à Frank Oppenheimer, 11 janvier 1935.

⁶ Cité par Denis Brian, *Einstein : A Life*, New York, John Wiley & Sons, 1996, p. 251.

⁷ *New York Times*, 7 mai 1935, p. 21.

comme Einstein). Un tel état s'est longtemps appelé un « état EPR », mais on parle plutôt aujourd'hui d'« état intriqué ».

De quoi s'agit-il ? Imaginons deux particules qui arrivent l'une vers l'autre et entrent en collision. Avant le choc, chacune d'elles est décrite par un certain vecteur d'état, et la paire qu'elle forme est elle-même décrite par le *produit* des deux vecteurs d'état individuels. Que devient ce produit après la collision ? Le calcul montre qu'alors, même lorsque les deux particules sont très éloignées l'une de l'autre, le vecteur d'état de la paire ne peut plus être factorisé en un produit de deux vecteurs d'état correspondant chacun à l'une des deux particules. Il s'écrit en effet comme une somme de deux produits, somme qui « mélange » les vecteurs d'états des deux particules, de sorte qu'on ne peut plus dire que, dans l'état final, chaque particule a son vecteur d'état bien à elle. Seule la paire, c'est-à-dire le système global et non pas ses éléments constitutifs, en possède un qui soit bien défini. Son vecteur d'état *entremêle* si fortement les deux particules que cela n'a pas de sens de parler des vecteurs d'état « finals » de chacune des deux particules.

Pour un tel état, le formalisme quantique prédit que des mesures de position sur chacun des deux électrons (si les deux particules sont des électrons) donneront des valeurs exactement symétriques par rapport à l'origine, et que des mesures des vitesses donneront des résultats toujours identiques. Pour une paire d'électrons dans un tel état, il suffit donc de mesurer la vitesse du premier électron pour connaître avec certitude celle de l'autre électron. Étant donné que les deux électrons sont éloignés l'un de l'autre, la mesure effectuée sur le premier ne saurait modifier l'état du second. Einstein et ses coauteurs en déduisent que le second électron possédait, *avant la mesure*, une vitesse parfaitement déterminée. Mais comme l'état quantique, lui, ne spécifie aucune valeur particulière pour la vitesse de cet électron, ils considèrent que cet état quantique ne reflète pas la totalité des propriétés de cet électron, et, par extension, que la physique quantique ne reflète pas non plus la totalité des propriétés de la « réalité physique ». Les trois auteurs en concluent que le formalisme de la physique quantique est incomplet, au sens défini plus haut.

Une expérience de pensée semblant contredire le principe d'indétermination de Heisenberg

L'argument d'incomplétude va encore plus loin si l'on remarque qu'au lieu de mesurer sa *vitesse*, on aurait pu choisir de mesurer la *position* du premier électron : on en aurait déduit la position du second, qui, du coup, apparaît, elle aussi, comme parfaitement déterminée et préexistante à toute mesure, contrairement à ce qu'avance la théorie quantique. Suivant le raisonnement EPR, ce sont en définitive aussi bien la vitesse que la

position du second électron qui avaient des valeurs déterminées avant toute mesure, en contradiction avec la description quantique de cet état qui ne spécifie aucune valeur particulière *a priori* pour ces grandeurs. De plus, l'affirmation que la vitesse et la position d'une même particule pourraient être *a priori* simultanément déterminées entre en contradiction avec le principe d'indétermination de Heisenberg, considéré comme capital par Bohr et ses partisans. En somme, selon Einstein, la physique quantique se prend les pieds dans son propre tapis conceptuel. Cela le conduit à la conclusion que j'ai déjà évoquée, à savoir que le formalisme quantique n'est pas complet : il lui manque « quelque chose » pour rendre compte de la totalité de la réalité physique, et il faut donc s'attacher à essayer de le compléter.

La réaction de Niels Bohr et des défenseurs de l'interprétation de Copenhague

Dès que l'article EPR parut, l'alerte fut donnée d'un bout à l'autre de l'Europe parmi tous les pionniers de la théorie des quanta. Depuis Zürich, Wolfgang Pauli, furieux, écrit une lettre à Werner Heisenberg, alors à Leipzig : « Einstein a encore fait une déclaration publique sur la mécanique quantique, et dans la *Physical Review*, en plus, dans son numéro du 15 mai (avec Podolski et Rosen, qui sont des gens par ailleurs peu recommandables). Il est bien connu, ajoute-t-il, que c'est une catastrophe chaque fois que ce genre de choses arrive⁸ ». Pauli concède néanmoins dans la même lettre « que si un étudiant de première ou deuxième année avait soulevé pareilles objections, il l'aurait trouvé très intelligent et prometteur. » Pauli pressa Heisenberg de publier une réfutation séance tenante pour empêcher toute confusion ou hésitation chez leurs collègues physiciens. Heisenberg rédigea un projet de réponse à l'article EPR, dont il envoya une copie à Pauli. Mais Heisenberg suspendit la publication de son article quand il apprit que Bohr soi-même avait déjà pris les armes pour défendre l'interprétation de Copenhague.

Léon Rosenfeld, qui se trouvait chez Bohr à Copenhague, se rappela que « l'attaque EPR nous était tombée dessus comme un coup de tonnerre dans un ciel serein. Ses effets sur Bohr furent remarquables⁹. » Toutes affaires cessantes, Bohr se persuada qu'un examen approfondi de l'expérience de pensée EPR révélerait où Einstein s'était trompé. Tout

⁸ Lettre de Wolfgang Pauli à Werner Heisenberg, 15 juin 1935, BCW, vol. 7, p. 251.

⁹ Leon Rosenfeld, “ *Niels Bohr in the thirties. Consolidation and Extension of the Conception of Complementarity* ”, in Stefan Rozental, *Niels Bohr : His Life and Work as seen by his Friends and Colleagues*, Amsterdam, 1967, p. 128.

excité, il dicta à Rosenfeld un brouillon de réponse. Mais très vite il commença à hésiter. « Non, ça ne va pas, il faut tout recommencer », marmonnait-il. Il comprenait peu à peu que l'argumentation EPR était extrêmement subtile, et même génial. De temps en temps, il se tournait vers Rosenfeld et lui demandait : « Qu'est-ce qu'ils peuvent bien vouloir dire ? Vous le comprenez, vous ?¹⁰ » Au bout d'un moment, un Niels Bohr de plus en plus agité comprit qu'une réfutation de l'article EPR serait plus difficile qu'il ne l'avait cru au début. Les six semaines qui suivirent, jour et nuit, il se consacra exclusivement à cette tâche, comme pris dans une sorte de transe.

Avant même d'avoir terminé sa réponse à EPR, Bohr écrivit le 29 juin une lettre à la revue *Nature*. Intitulée « Mécanique quantique et réalité physique », elle décrivait succinctement sa contre-attaque. Une fois de plus, le *New York Times* flaira le scoop. « Divergence entre Bohr et Einstein. Ils entament une controverse sur la nature de la réalité. » Telle était la manchette de l'article qui parut le 28 juillet 1935. Les lecteurs apprenaient que « La controverse entre Bohr et Einstein vient de commencer cette semaine dans le dernier numéro de *Nature*, avec un défi préliminaire du Professeur Bohr à l'adresse du Professeur Einstein, et avec la promesse du Professeur Bohr qu'« un développement plus complet de cette argumentation sera donnée dans un article qui paraîtra sous peu dans la *Physical Review*. »

Sa réponse en six pages fut reçue par cette revue le 13 juillet 1935¹¹. Elle s'intitulait elle aussi : « La description de la réalité physique par la mécanique quantique peut-elle être considérée comme complète ? ». La réponse de Bohr, publiée le 15 octobre, était un « Oui » sans équivoque, même si l'article lui-même, il faut bien le dire, est plutôt confus. Incapable d'identifier la moindre erreur dans l'argumentation d'EPR, Bohr en fut réduit à affirmer que les preuves fournies par Einstein n'étaient pas assez fortes pour soutenir que la physique quantique était incomplète. Sa critique portait essentiellement sur le critère de réalité d'Einstein (sur lequel je reviendrai), dans lequel il pensait avoir identifié une faiblesse rédhibitoire.

En fait, je crois que Niels Bohr fut à la fois émerveillé et troublé par l'argument EPR, car ce dernier s'appuyait explicitement sur le formalisme quantique, sans nullement le contester, et semblait en démontrer le caractère incomplet, inachevé, et donc certainement provisoire. Mais, de façon assez confuse, il pressentit que si le raisonnement EPR était vraiment correct, c'est toute la physique quantique qui s'effondrerait. Il le contesta donc,

¹⁰ Ibid., p. 128.

¹¹ Niels Bohr, *Physical Review* 48, 696, 1935.

en affirmant que dans un état quantique de type EPR, c'est-à-dire un état « non factorisable », on ne peut plus parler des propriétés individuelles de chaque électron, et cela même s'ils sont très éloignés l'un de l'autre. Les deux particules forment un tout inséparable, une sorte de couple insécable même lorsque celui-ci est très étalé spatialement.

Des années plus tard, en 1947, Bohr reconnut que son papier n'était pas clair du tout. Il avoua même ce qu'il appela une certaine « inefficacité d'expression ». Il essaya alors de préciser que l'ambiguïté essentielle à laquelle il avait voulu faire allusion dans sa réponse à EPR résidait dans le fait d'invoquer des « attributs physiques des objets quand on traite de phénomènes où on ne peut faire une distinction tranchée entre le comportement de ces objets eux-mêmes et leur interaction avec les instruments de mesure¹² ».

Dix ans plus tôt, en février 1937, Bohr était venu à Princeton pour un séjour d'une semaine dans le cadre d'une tournée mondiale de six mois. C'était pour Einstein et Bohr la première occasion de se rencontrer face à face depuis la publication de l'article EPR. Valentin Bargmann, qui deviendra plus tard l'un des assistants d'Einstein, fut le témoin d'une partie de leurs échanges. Il rapporta que « leur discussion sur la mécanique quantique n'était pas du tout passionnée, mais un observateur extérieur aurait eu l'impression d'un dialogue de sourds.¹³ » La moindre discussion significative, ajouta-t-il, aurait exigé « des jours et des jours », et c'est sans doute pourquoi « il y eut beaucoup de non-dits¹⁴ ».

En fait, leurs positions respectives étaient irrémédiablement figées. Bohr croyait que la physique quantique était une théorie fondamentale complète de la nature, et c'est sur elle qu'il édifia sa conception philosophique du monde, ce qui le conduisit à déclarer : « C'est une erreur de croire que la tâche de la physique est de découvrir comment est la nature. La physique traite de ce que nous pouvons dire de la nature.¹⁵ »

Quant à Einstein, vous l'avez compris, il avait un point de vue rigoureusement opposé. Il fondait sa compréhension de la physique quantique sur la croyance inébranlable en l'existence d'une réalité indépendante de l'observateur. Par conséquent, il ne pouvait pas accepter l'interprétation de Copenhague. Il écrivit d'ailleurs : « Ce que nous appelons science a pour unique but de déterminer ce qui *est*.¹⁶ »

¹² Niels Bohr, « *Discussion with Einstein on Epistemological Problems in Atomic Physics* », in Paul Schilpp, *Albert Einstein : Philosopher-Scientist*, New York, MJF Books, p. 234.

¹³ Cité par Denis Brian, *Einstein : A Life*, New York, John Wiley & Sons, 1996, p. 304.

¹⁴ Ibid..

¹⁵ Cité par Aage Petersen, « *The Philosophy of Niels Bohr* », in A. P. French & P. J. Kennedy, *Niels Bohr : A Century*, Harvard University Press, 1985, p. 305.

La longue indifférence des physiciens

On pourrait penser que ce débat, qui était on ne peut plus fondamental puisqu'il touchait les fondations même de la physique du monde microscopique, a eu forcément un immense écho chez les physiciens. Mais en réalité, pas vraiment. À cette époque, la physique quantique allait de succès en succès, au niveau de l'atome, puis au niveau du noyau de l'atome, puis au niveau des particules élémentaires qui sont encore plus petites, et la plupart des physiciens ignorèrent ces questions qui leur paraissaient académiques, voire métaphysiques, au sens de « au-delà de la physique », bien sûr, mais aussi au sens de « sans conséquence pour la physique elle-même » : l'adhésion à l'une ou l'autre des deux positions leur semblait affaire de goût personnel ou de choix épistémologique, sans que cela ait la moindre conséquence sur la mise en œuvre du formalisme quantique (Einstein lui-même ne disait pas qu'il fallait utiliser autrement la physique quantique, mais simplement changer la façon de la considérer et de l'interpréter). Pendant trente ans, les termes du débat ne furent guère modifiés. Le seul événement marquant fut le travail de David Bohm qui proposa une version de l'expérience de pensée EPR portant non plus sur des observables continues, comme la position ou la vitesse, mais sur des observables discrètes ne pouvant prendre que deux valeurs, comme la projection du spin d'un électron sur un axe, ou comme la polarisation d'un photon mesurée le long d'une certaine direction. Mais en 1964, un physicien irlandais du CERN, John Bell, allait modifier radicalement la situation dans un article génial de quelques pages seulement (décidément, quand on tourne autour des questions essentielles, nul besoin d'être prolix). Pour en comprendre toute la portée, il me faut revenir un instant sur le contenu précis de l'article EPR.

Le critère de réalité de l'article EPR

Dans cet article, les hypothèses de départ explicitement choisies par Einstein étaient au nombre de trois :

(a) Les prédictions de la physique quantique sont justes.

(b) Aucune influence ne peut se propager plus vite que la lumière. Cette hypothèse prend en compte les acquis de la théorie de la relativité. Elle implique qu'il y a des cas où l'on peut être certain que, de deux événements, aucun n'influence l'autre : lorsque ces deux événements sont si lointains dans l'espace et si rapprochés dans le temps que la lumière n'a pas le temps de les relier. Ils se passent donc « chacun dans son coin », sans qu'aucune

¹⁶ Lettre d'Albert Einstein à Maurice Solovine du 1^{er} janvier 1951.

relation causale puisse les connecter l'un à l'autre. On appelle cette hypothèse le « principe de localité d'Einstein ».

(c) Si, en ne perturbant aucunement un système, on peut prédire avec certitude (c'est-à-dire avec une probabilité égale à l'unité) la valeur d'une quantité physique, alors il existe un élément de réalité physique correspondant à cette quantité physique.

Ce qu'Einstein énonce ici n'est rien d'autre qu'un critère de réalité très général. Il précise en somme ce qu'il entend par le concept *d'objet réel*. La définition qu'il propose semble compliquée, mais elle est en réalité conforme au bon sens : si je peux prédire le résultat de la mesure que je ferai d'une certaine propriété physique, et si ma prédiction est juste à tous les coups, alors j'ai tout lieu de penser que la valeur trouvée pour cette propriété n'est ni une hallucination, ni une chimère : un élément de réalité doit nécessairement lui correspondre. Et le formalisme, lui, doit être capable d'intégrer cet élément de réalité, que cet élément de réalité fasse ou non l'objet d'une mesure. C'est à cette seule condition qu'une théorie physique peut, selon Einstein, être présentée comme complète.

Prenons un exemple simple. Supposons que nous disposions de deux cartes, l'une bleue, l'autre verte, et que nous les placions chacune dans une enveloppe scellée. Battons les deux enveloppes comme on bat des cartes, puis donnons-en une à Paul et l'autre à Jules. Quand Paul ouvre son enveloppe, il découvre la couleur de sa carte : la probabilité qu'elle soit bleue était égale à un demi ; idem pour qu'elle soit verte. Le résultat qu'il obtient est évidemment « anti-corrélé » avec celui qu'obtiendra Jules : si la carte de Paul est bleue, celle de Jules sera verte et réciproquement. Nul paradoxe n'apparaît ici : la couleur de la carte de Paul et de celle de Jules ont été « tirées au sort » au moment du mélange des enveloppes et ce n'est certainement pas le fait que Paul prenne connaissance de la couleur de sa carte qui détermine la couleur de la carte de Jules. C'est ce type d'arguments que l'hypothèse (c) d'Einstein condense : il y a un élément de réalité physique associé à la couleur de la carte de Jules puisque, sans la perturber en quoi que ce soit, c'est-à-dire sans ouvrir l'enveloppe de Jules, on est capable de déterminer la couleur de sa carte. Il suffit pour cela de demander à Paul son propre résultat.

Ce qu'Einstein démontre ensuite, c'est que l'application de ce critère de réalité physique à la théorie quantique conduit au « paradoxe EPR ». Plus précisément, il établit que l'ensemble des hypothèses (a), (b) et (c), lorsqu'on les applique à une certaine expérience de pensée (celle que nous avons décrite plus haut), conduit à attribuer aux sous-systèmes - par exemple les éléments d'une paire de particules - des propriétés dont le formalisme quantique ne rend pas compte. Ce dernier est ainsi pris en flagrant délit

d'incomplétude. Et Einstein de conclure qu'il doit exister un niveau de description plus fin de la réalité que celui que propose la physique quantique, et qui reste à découvrir.

Dans sa réponse à l'article EPR, Niels Bohr s'oppose à cette conclusion en expliquant que le critère de réalité d'Einstein ne peut être retenu : puisqu'il est impossible d'obtenir une séparation nette entre le comportement des particules et leur interaction avec les appareils de mesure, on doit considérer que la vitesse d'une particule, par exemple, n'est pas une propriété de la particule elle-même, mais une propriété partagée entre la particule et l'instrument de mesure. De plus, dès lors que la physique quantique se montre capable de quantifier les possibilités de résultats dans toutes les situations expérimentales permettant l'apparition d'un phénomène, elle doit être considérée comme « prédictivement complète », et cette « complétude de la prédictivité », c'est le mieux que l'on puisse exiger d'une théorie physique.

La controverse entre Bohr et Einstein à propos du paradoxe EPR a une envergure philosophique puisqu'elle touchait à la conception que l'on doit se faire du monde physique, au rôle des théories qui tentent de la décrire, à leur statut vis-à-vis de la réalité empirique. Mais elle était aussi du ressort de la physique, du moins dans les termes où la formulait Einstein. Celui-ci tenait en effet que le caractère à ses yeux incomplet de la physique quantique impliquait l'apparition dans l'avenir d'une théorie « meilleure », c'est-à-dire complète au sens qu'il donnait à ce mot. Mais Einstein n'indiqua pas lui-même la marche à suivre pour compléter la théorie quantique. Plusieurs physiciens, tels Louis de Broglie et David Bohm, le firent en ajoutant des paramètres supplémentaires permettant de compléter la description des états physiques, ce qu'on appelle des « variables cachées ».

Le coup d'éclat de John Bell

J'en viens maintenant au coup d'éclat de John Bell, en 1964¹⁷. En fait, l'affaire a été élucidée en deux temps : d'abord, la découverte théorique capitale accomplie par ce physicien théoricien irlandais que j'ai déjà évoquée et que je vais maintenant pouvoir expliciter, puis par plusieurs tests expérimentaux, qui devinrent vite cruciaux.

John Bell était au départ un physicien « réaliste » comme Einstein, c'est-à-dire qu'il était *a priori* porté à partager son point de vue selon lequel les événements surviennent d'eux-mêmes, indépendamment du contexte expérimental de leur manifestation. Mais il remarqua cependant quelque chose de bien curieux : toutes les théories qui avaient été bâties dans le but de compléter la physique quantique grâce à l'introduction de paramètres

¹⁷ John Bell, *Physics*, 1, 195, 1964.

supplémentaires, notamment celles de Louis de Broglie et de David Bohm, ne parvenaient à satisfaire aux hypothèses (a) et (c) qu'en violant l'hypothèse de localité (b). Autrement dit, ces théories étaient « non locales ». S'agissait-il d'une imperfection de ces théories particulières ou était-ce une propriété générale de toutes les théories à variables cachées susceptibles d'être construites ? C'est précisément ce que John Bell voulut savoir. À sa grande surprise, il put démontrer de façon formelle que n'importe quelle théorie prétendant décrire la réalité et satisfaisant aux hypothèses (a) et (c) viole nécessairement l'hypothèse (b) ou une hypothèse de portée très similaire.

Enfin, une possibilité de test expérimental de l'argument EPR

Ce n'est pas tout. Grâce à ce théorème, Bell put en outre prouver que toute théorie réaliste satisfaisant aux trois hypothèses d'Einstein entraîne des « restrictions » portant sur les résultats prévus pour certaines mesures. Ces restrictions peuvent être écrites sous forme d'inégalités, qu'on appelle les « inégalités de Bell ». C'est là qu'est le point capital, le nœud de l'affaire : comme la physique quantique n'est pas une théorie réaliste au sens d'Einstein, il doit être possible d'imaginer des situations particulières pour lesquelles ses prédictions entrent en conflit avec les inégalités de Bell (qui ne contraignent que les prédictions des théories satisfaisant aux trois critères EPR).

Par exemple, la physique quantique prédit que les corrélations entre des photons émis en cascade par le même atome sont plus fortes que ce qu'indiquent les théories locales à variables cachées. *Plus généralement, il n'est pas possible de « comprendre » dans leur totalité les corrélations de type EPR en complétant le formalisme quantique dans l'esprit suggéré par Einstein.* Ce résultat a quelque chose d'étonnant. Jugez-en : si on l'appliquait au cas de deux vrais jumeaux pour lesquels on observe des corrélations très fortes aussi bien dans le profil biologique que dans les caractéristiques physiques (couleur des yeux, des cheveux,...), ce résultat impliquerait qu'on doive renoncer à expliquer ces corrélations en invoquant des jeux de chromosomes identiques pour les deux jumeaux, au motif que ces chromosomes joueraient le rôle de paramètres locaux et cachés !

Grâce aux inégalités de Bell, la controverse entre Bohr et Einstein allait pouvoir être tranchée au laboratoire : une vérification expérimentale devenait possible, qui devait soit mettre en défaut la physique quantique et sa description d'une réalité presque fantomatique, soit exclure l'existence, derrière elle, d'une théorie qui rendrait compte d'une réalité objective et localement définie.

Le verdict de l'expérience

Au début des années 1970, une première série d'expériences avec des photons corrélés donna des résultats contradictoires, ce qui n'était guère étonnant compte tenu de l'extrême faiblesse des signaux accessibles à l'époque. C'est seulement au début des années 1980 qu'une équipe de l'Institut d'optique d'Orsay, dirigée par Alain Aspect, mena à bien une série d'expériences montrant de façon claire, et la violation des inégalités de Bell et la confirmation des prédictions quantiques. Depuis, d'autres expériences plus sophistiquées et plus précises, menées avec des photons mais aussi avec des ions ou d'autres particules de matière, ont montré de façon irréfutable l'absence d'échappatoire pour les théories à variables cachées locales¹⁸. Qu'est-ce à dire ? Que dans certaines situations, deux particules qui ont interagi dans le passé ont des propriétés que leur distance mutuelle, aussi grande soit-elle, ne suffit pas à séparer. Elles constituent un tout inséparable, au sens où ce qui arrive à l'une des deux, où qu'elle soit dans l'univers, est irrémédiablement intriqué avec ce qui arrive à l'autre particule dans un autre coin de l'univers. Ce comportement global neutralise toute tentative d'explication en termes de particules possédant chacune en propre, à l'avance, la propriété qu'on a décidé de mesurer.

Que conclure de tout cela ? Qu'il faut *définitivement* renoncer à interpréter la physique quantique dans le sens des idées d'Einstein : il n'existe aucun espoir de pouvoir la compléter en construisant une théorie locale à variables cachées.

Les applications de l'intrication quantique

Même si elle n'est pas très bien nommée, la « non-séparabilité » est sans aucun doute la caractéristique la plus profonde et la plus originale de la physique quantique. Aujourd'hui parfaitement établie sur le plan expérimental, elle doit être considérée comme une propriété fondamentale de la nature. Mais son statut épistémologique demeure l'objet de discussions serrées. Une chose, toutefois, est certaine : cette non-séparabilité qui choquait tant Einstein ne viole nullement le principe de causalité. Cela signifie qu'on ne peut se servir des corrélations de type EPR pour transmettre de l'information instantanément entre deux points séparés dans l'espace. Mais cela n'empêche nullement que l'intrication ait des applications pratiques. Ces dernières années, des physiciens sont parvenus à l'utiliser pour faire de la cryptographie quantique, qui consiste en l'émission de messages uniquement déchiffrables par l'émetteur et par le destinataire. Ils l'ont également utilisée pour téléporter

¹⁸ On trouvera une remarquable présentation synthétique de ces expériences dans l'article signé par Alain Aspect et Philippe Grangier dans l'ouvrage collectif « Einstein aujourd'hui » (EDP-Sciences, coll. Savoirs Actuels, 2005, pp. 43-86.)

des états quantiques, c'est-à-dire pour transporter une information à distance grâce à une sorte de « fax quantique ».

Que conclure ?

Les créateurs de la science moderne, les Galilée et autres Descartes, adhéraient (pour ce qui est de la physique) au « mécanicisme » : selon eux, toute description devait être formulée au moyen des seuls concepts de position, figures et mouvement, concepts que Descartes considérait comme innés, et donc nous constatons qu'en tout cas ce sont des concepts familiers (ou qui du moins nous sont devenus familiers). Sous l'influence d'une vulgarisation hâtive, ce mécanicisme un peu simplet continue d'irriguer notre façon de parler des objets physiques, et cela bien que le vingtième siècle ait clairement montré qu'il doit être dépassé : les relativités, restreinte ou générale, ont montré que les concepts familiers ne sont pas les mieux adaptés à la compréhension du monde physique, qu'ils sont même trompeurs et doivent être remplacés par des concepts mathématiques, qui permettent d'aller vraiment au-delà des concepts familiers et donnent à la physique toute sa puissance. Le mécanicisme classique a ainsi été détrôné par ce nous pourrions appeler l'« einsteinisme », qui consiste en l'idée que la réalité est structurée, qu'elle n'est pas atteignable au moyen des seuls concepts familiers, mais que cependant, grâce aux mathématiques qui fournissent les bons concepts, elle est connaissable et intelligible. L'einsteinisme est en quelque sorte aux physiciens théoriciens ce que le platonisme ou le pythagorisme est aux mathématiciens

Compte tenu de ce que nous savons maintenant de la non-séparabilité quantique, dont la découverte constitue une authentique « découverte philosophique négative », il se pourrait que l'einsteinisme ne soit pas le fin mot de l'histoire.