

2.1

L'étrange monde quantique

« *L'esprit et le monde construisent conjointement
l'esprit et le monde.* »

Putman H. *Raison, Vérité et Histoire* (1981)¹

De Kant aux quanta : un même combat ?

Il est une question classique en philosophie qui consiste à se demander ce que deviennent les objets lorsque nous ne sommes pas là pour les observer. Ainsi le philosophe empiriste Berkeley considérait que nous n'appréhendons le monde qu'à travers nos perceptions et il affirmait de façon radicale que les objets ne pouvaient exister en dehors de nos sens. Selon Kant toutefois, il existe bien « quelque chose » qui se trouve « au-delà » de nos perceptions. Toutefois selon lui cet « au delà » est inconnaissable. C'est ce qu'il appelle le monde « en soi » par opposition au monde « pour soi ». Ainsi, selon Kant, le monde « en soi » n'a ni dimension, ni position et il est indépendant du temps puisque l'espace et le temps ne sont que des formes *a priori* de notre sensibilité.

Déjà Aristote distinguait les qualités primaires et secondaires des objets. Les qualités primaires (objectives) étaient indépendantes de l'observateur tandis que les qualités secondaires (subjectives) étaient en fait présentes dans l'esprit du sujet observant. Parmi les qualités secondaires, Aristote plaçait les couleurs, les saveurs et les odeurs. Les qualités primaires comprenaient la position, la forme, le mouvement. Ainsi, selon ces philosophes, la couleur rouge d'une rose n'appartient pas à la fleur. De nos jours, un physicien dirait qu'elle réfléchit les rayons lumineux d'une certaine longueur que notre cerveau « interprète » comme étant la « couleur rouge ». Cette dernière est donc « dans notre tête » et pas sur la fleur. C'est l'interprétation que notre cerveau fait de nos perceptions qui le conduit à plaquer littéralement les couleurs (c'est-à-dire des sensations)

¹ Putman H. *Raison, Vérité et Histoire. Minuit* (1984) ; traduction française de Reason, Truth and History, Cambridge University Press, 1981). Cité par H. Zwirn (*Les limites de la connaissance*, p. 279).

sur les objets qui nous entourent. Mais pourquoi s'arrêter en chemin. Ne pouvons-nous pas faire le même raisonnement pour l'ensemble de nos sens ?

C'est pourquoi d'autres philosophes tels que Locke et Descartes ont fait un pas de plus en considérant que les qualités primaires (objectives) dépendaient elles aussi de l'observateur. Toutefois, dira-t-on, lorsqu'on nous sommes arrêtés dans notre course par un mur, n'est-ce pas la preuve qu'il existe bien quelque chose « en dehors de nous », quelque chose qui « résiste » ? N'est-ce pas la preuve qu'il existe bien une réalité à laquelle nous nous « heurtons » ?

Or, nous savons que tout objet est constitué d'atomes et depuis le début du 20^{ème} siècle, nous avons appris grâce à la révolution de la physique quantique que les constituants des atomes n'ont d'« existence » que si un observateur les « révèle » par une mesure. Plus exactement c'est parce qu'un observateur réalise une opération de mesure que le paramètre mesuré a une valeur fixée. En dehors de cet acte d'observation le paramètre est dans un état « indéterminé ». Nous verrons qu'il existe diverses interprétations de ce qu'est une « mesure ». Ainsi le physicien Bernard d'Espagnat rejoint Kant d'une certaine façon puisqu'il considère comme ce dernier qu'il y a bien « quelque chose » au-delà de nos sens et de nos appareils de mesure mais que ce quelque chose ne peut être séparé en éléments distincts et qu'il n'est pas descriptible en termes de temps et d'espace. Sans observateur, il n'y aurait donc pas de particules élémentaires, d'atomes, de molécules et d'objets ! Et ce que nous « percevons » – la réalité « pour nous » – serait lié à la confrontation de la réalité « en soi » et de notre conscience.

Cette conception d'un rôle de la conscience pour faire « émerger » la réalité telle que nous la percevons heurte violemment les biologistes pour lesquels la pensée est en quelque sorte « sécrétée » par le cerveau, « comme le foie sécrète la bile » pour reprendre une formulation classique. Et, selon cette dernière conception, la pensée ne pourrait naître en effet de quelque chose qu'elle contribue à rendre actuel. Mais, comme nous l'avons dit en introduction, la physique des biologistes est une physique qui pour les physiciens contemporains constitue un cas limite. Les biologistes quant à eux sont toujours persuadés – en tout cas c'est sur ce paradigme que reposent les grands courants de recherche actuels – que le découpage du Vivant en ses éléments moléculaires reste un but non seulement désirable mais optimal pour agir en retour. Et effectivement on ne peut dénier une efficacité, souvent spectaculaire, à cette démarche. Mais est-ce parce que l'on agit (plus ou moins) efficacement sur la matière vivante que cela prouve que l'on a « compris » l'objet que l'on étudie ?

Rendre compte de façon simple et accessible des développements de la physique quantique depuis ses débuts n'est pas une démarche aisée surtout pour qui ne peut se prévaloir de la légitimité du physicien. Incarner à soi seul les

Bouvard et Pécuchet de la physique quantique est un risque qui doit être assumé. Nous proposons donc au lecteur novice qui souhaiterait aborder ce domaine de consulter les ouvrages et documents indiqués en note.¹ Il ne saurait être question ici de faire l'historique de la question et de décrire tous les aspects de cette discipline. Nous nous bornerons à décrire à larges traits les principes essentiels régissant cette « nouvelle » physique, vieille maintenant de près de cent ans, et qui a connu un tournant capital dans les années 70–80.

Nous proposons de commencer par la description d'expériences classiques de physique quantique permettant d'explicitier les notions qui seront nécessaires à la poursuite de la lecture et en particulier à la compréhension de ce que sont les *corrélations non locales* et leurs conséquences.

Qu'est-ce que la physique quantique ?

Le propos initial de la physique quantique était de décrire la matière à l'échelle des atomes et de leurs constituants. Rapidement des difficultés surgirent. Ainsi le modèle « planétaire » de l'atome échouait à expliquer pourquoi les électrons qui gravitent autour du noyau ne tombent pas rapidement sur ce dernier. De même la lumière était considérée comme un rayonnement, mais des expériences indiquaient qu'elle pouvait se comporter également comme un ensemble de petites « billes », les photons. Alors, était-elle un rayonnement ? Des particules ? Les deux à la fois ? Et dans ce dernier cas comment pouvait-on se « représenter » un rayon de lumière ?

Les ouvrages de vulgarisation ou les manuels scolaires présentent implicitement les atomes et les molécules comme de minuscules billes qui s'agitent selon les lois classiques de la mécanique newtonienne. Cette image est non seulement simplificatrice mais surtout elle est fautive. Elle doit donc être

¹ Michel Bitbol. L'aveuglante proximité du réel. *Flammarion*, 1998 ; Michel Bitbol. Physique et philosophie de l'esprit. *Flammarion*, 2000 ; Michel Bitbol & Sandra Laugier (eds.) Physique et réalité (Un débat avec B. d'Espagnat). *Editions Frontières-Diderot*, 1997 ; Colin Bruce. Les lapins de M. Schrödinger ou comment se multiplient les univers quantiques. *Le Pommier*, 2004 ; Bernard d'Espagnat. Traité de physique et de philosophie. *Fayard*, 2002 ; Bernard d'Espagnat et Étienne Klein. Regards sur la matière : des quanta et des choses. *Fayard*, 1993 ; Etienne Klein. Petit voyage dans le monde des quanta. *Flammarion*, 2004 ; Feynman, Leighton et Sands. Le cours de physique de Feynman. Tome 3. Mécanique quantique. *InterEditions*, 1979 ; Roland Omnès. Les racines quantiques du monde classique. *Pour la Science*, décembre 2001, p. 38 ; Roland Omnès. Une nouvelle interprétation de la mécanique quantique. *La Recherche*, octobre 1995, p. 50 ; Sven Ortoli et Jean-Pierre Pharabod. Le cantique des quantiques : le monde existe-t-il ? *La Découverte*, 1984 ; Hervé Zwirn. Les limites de la connaissance. *Odile Jacob*, 2000 ; Le chat de Schrödinger. *Sciences et Avenir* (hors-série), oct-nov. 2006.

oubliée – ou du moins être mise à distance – même si elle conserve une valeur heuristique certaine. La physique quantique nous fait en effet pénétrer dans un monde où le sens commun est choqué à chaque instant. La réalité n’y est plus décrite comme quelque chose de tangible qui existerait en dehors de nous mais formée d’entités évanescentes qui ont une certaine probabilité de réalisation si on les observe. L’acte d’observation y devient en effet un acte créatif en ce sens qu’avant l’observation (ou la mesure), la « valeur » du paramètre à mesurer n’est pas « déjà là ». Insistons dès maintenant sur le fait que cette incertitude qu’introduit la physique quantique se rapporte à un indéterminisme fondamental. Il ne s’agit pas d’une insuffisance de nos moyens de mesure (ou de nos théories). On pourrait dire que la Nature elle-même ne sait pas avant la mesure quelle est la valeur du paramètre à mesurer pour la simple raison que cette valeur n’est pas fixée. Pour le physicien quantique orthodoxe, attribuer une « valeur » à un « paramètre » en dehors de tout acte d’observation ou de mesure n’a tout simplement aucun sens. Une « valeur » n’existe que par rapport à l’acte de la mesure qui implique non seulement un appareil mais également un observateur qui *prend connaissance* du résultat.

On pourrait penser – la physique quantique s’adressant au monde microscopique – qu’il n’est pas étonnant que les lois physiques qu’elle décrit soient différentes de celles de notre monde macroscopique. On pourrait supposer néanmoins que ce dernier continuerait à se comporter comme nous en avons l’habitude avec sa loi de causalité et son déterminisme classique. Toutefois l’ambition de la physique quantique est de décrire non seulement le monde microscopique des atomes, de la lumière et des particules élémentaires mais également le monde macroscopique qui nous est familier. Les objets qui nous entourent et nous-mêmes étant constitués d’atomes, nous sommes donc *a priori* également soumis aux lois de la physique quantique. Et précisément les pères de la physique quantique se sont rapidement heurtés à des paradoxes lorsqu’ils ont tenté de tirer toutes les conséquences de la nouvelle physique pour comprendre notre monde macroscopique. Des débats intenses à propos d’« expériences de pensée » eurent lieu. Et nous verrons comment une théorie développée à la fin du 20^{ème} siècle, la théorie de la décohérence, se propose d’expliquer le passage de l’étrangeté de la physique quantique au niveau microscopique à la réalité tangible de notre monde macroscopique. Pourtant nous verrons également que même à notre échelle nous n’en avons pas fini avec l’étrangeté quantique.

Les conséquences de ces découvertes réalisées tout au long du 20^{ème} siècle restent toutefois mal diffusées dans le grand public et même parmi les scientifiques non physiciens. C’est d’autant plus paradoxal que les applications de la physique quantique telles que le laser ou encore le transistor (et par voie de

conséquence les ordinateurs) se sont répandues avec le succès que l'on sait. On pourrait imputer les raisons de cette méconnaissance aux mathématiques sous-tendant ces théories qui sont effectivement d'un abord difficile. C'est certainement une raison importante. Pourtant les concepts issus de la relativité restreinte n'étaient pas non plus d'un accès aisé et étaient également choquantes pour le sens commun car ils remettaient en cause l'idée d'un temps s'écoulant de la même façon pour tous et partout. Mais peut-être la raison réside-t-elle dans le caractère proprement révolutionnaire des conséquences des équations de la physique quantique dès lors que l'on essaye de les « comprendre » et d'en tirer toutes les conséquences.¹ Et si l'ensemble des physiciens s'accordent sur les équations de la physique quantique, leurs interprétations les divisent (ceux du moins que les questions « philosophiques » intéressent). Différentes interprétations ont ainsi vu le jour. Certaines font jouer un rôle capital à l'observateur et à la « conscience » pour « créer » la réalité, d'autres postulent l'idée de différentes versions de la réalité existant simultanément.

En fait ces différentes interprétations n'apparaissent être qu'une question de préférences et de goûts personnels car elles sont bien évidemment toutes en accord avec les différents postulats de la physique quantique qui sont maintenant solidement établis. En particulier nous verrons que notre appartenance à un monde « non local » est maintenant établie par l'expérimentation. Si une nouvelle théorie venait à remplacer la physique quantique, elle devrait intégrer cette donnée fondamentale qui a pris son indépendance vis-à-vis de la théorie qui est à son origine. Nous avons donc le choix : nous pouvons choisir l'interprétation qui nous convient le mieux ; le seul problème est que nous sommes condamnés à ne pouvoir choisir qu'entre l'étrange et le bizarre.

L'expérience des fentes de Young

L'expérience des fentes de Young est à la fois la plus simple et la plus riche des expériences de la nouvelle physique. Cette expérience dont le physicien R. Feynman disait qu'elle recélait toute l'étrangeté de la physique quantique, va nous permettre de toucher du doigt ce qui fonde cette remarque.

Nous connaissons tous cette expérience, au moins dans sa version du 18^{ème} siècle telle que Young l'avait décrite initialement. Elle avait permis à ce dernier de démontrer le caractère ondulatoire de la lumière.

¹ On dit parfois que plus on étudie la relativité restreinte et plus on la comprend, mais qu'en revanche plus on étudie la physique quantique et moins on la comprend.

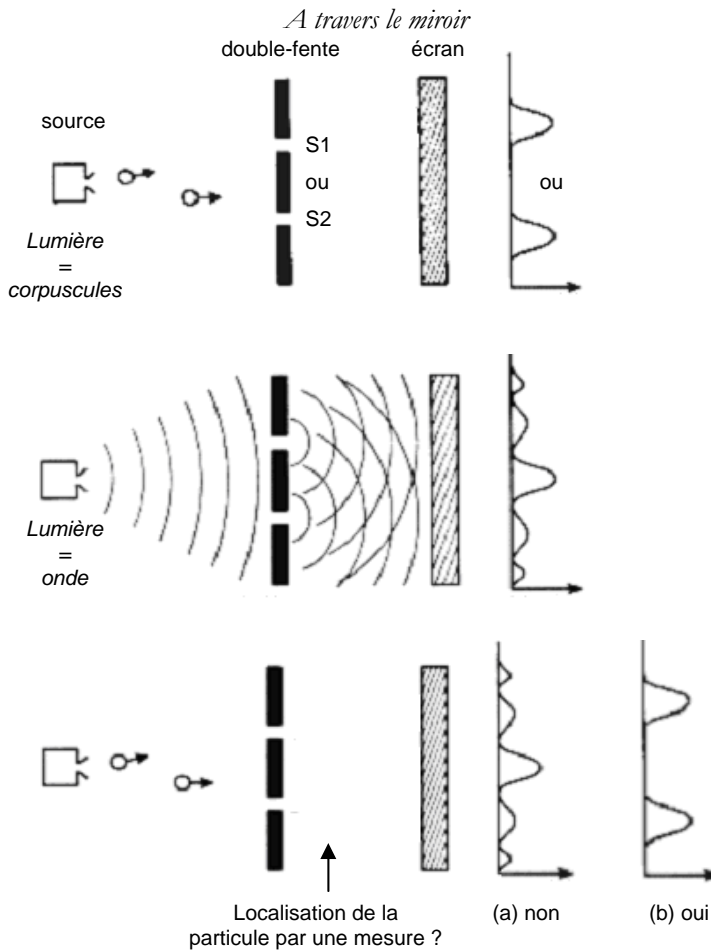


Figure 14. L'expérience des fentes de Young. Une source de lumière émet des photons à travers deux fentes parallèles très proches. Si on bouche l'une des fentes, on observe une tâche lumineuse en face de la fente restée ouverte. Les photons paraissent se comporter comme des corpuscules dont on peut déterminer l'impact sur l'écran. En revanche si on laisse les deux fentes ouvertes on observe non pas deux tâches lumineuses mais des raies alternativement lumineuses et sombres : il y a eu interférence (ce qui est caractéristique d'une onde). Si on fait en sorte que les photons soient émis *l'un après l'autre*, une figure d'interférence se dessine également comme si chaque photon était passé *par les deux fentes* à la fois et *interférait avec lui-même* (a). Si on cherche à connaître par un moyen physique quelconque *par quel chemin* est passé le photon, alors les figures d'interférences disparaissent et les photons se comportent comme des corpuscules (b). L'expérience peut être également réalisée avec d'autres particules telles que des électrons (Figure 15).

Dans cette expérience, une source lumineuse S issue d'une fine fente éclaire une surface percés de deux autres fines fentes parallèles S1 et S2 très proches l'une de l'autre (Figure 14).

Le but de l'expérience consiste à observer sur un écran les taches lumineuses formées par la lumière issue de ces deux fentes dans différentes conditions expérimentales. Imaginons dans un premier temps les conséquences du lancer de petites billes à l'aide d'un dispositif similaire à celui des fentes de Young (nous adaptons bien entendu la largeur des fentes au diamètre des billes). Nous supposons que les projectiles qui ont traversé les fentes laissent une trace de leur impact sur l'écran de détection. Suite à la projection des billes en direction de la double fente à l'aide d'un propulseur, nous constatons que les impacts des billes qui ont traversé les fentes sont plus fréquents sur les zones de l'écran qui font face à S1 et S2. Ceci n'a rien pour nous étonner.

Revenons maintenant au dispositif classique des fentes de Young et éclairons les fentes par un fin rayon lumineux monochromatique. Dans un premier temps nous bouchons S1 et nous constatons comme nous pouvions nous y attendre que la lumière diffusée par S2 forme une tache lumineuse sur l'écran comme c'était le cas avec les billes (Figure 14 ; haut). Nous faisons bien entendu une constatation similaire en inversant les rôles de S1 et S2. En revanche si nous laissons ouvertes les deux fentes simultanément nous observons un phénomène tout à fait intéressant : une alternance de raies sombres et claires sur l'écran de détection (Figure 14 ; milieu). On dit alors que les rayons lumineux ont *interféré* et c'est un argument en faveur de la nature ondulatoire de la lumière.

On obtient alors un résultat étonnant : des figures d'interférences sont observées à nouveau. Même envoyés individuellement en direction des deux fentes, les photons persistent dans leur comportement ondulatoire ! On aurait pu penser en effet que lorsque les photons étaient émis en grandes quantités, les figures d'interférences résulteraient d'interactions entre photons et que leur émission individuelle conduirait à des impacts uniquement en face des fentes (de façon similaire à ce qui se produisait ci-dessus avec les petites billes). Or ici tout se passe comme si chaque particule *interférait avec elle-même*, comme-ci chaque particule passait par *les deux fentes à la fois*. Cette expérience a été également réalisée avec d'autres particules telles que les électrons ou les neutrons généralisant ainsi la dualité onde-particule (Figure 15).

Mais le plus étonnant est à venir. Reprenons le dispositif précédent où les particules sont émises l'une après l'autre. Nous ajoutons un système qui permet de « voir » par quelle fente passe la particule. Nous ne faisons que regarder passer la particule en la perturbant le moins possible. Nous constatons alors que

les figures d'interférence disparaissent et nous obtenons les mêmes figures que pour les petites billes ! (Figure 14 ; bas).

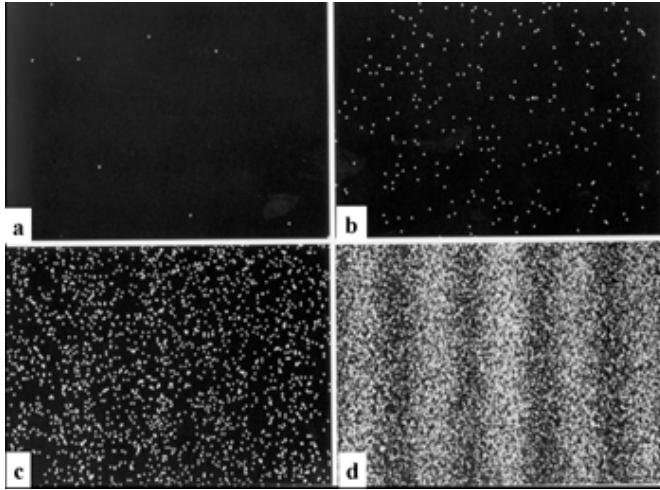


Figure 15. Cette série de photographies est le résultat de l'expérience de la double fente réalisée non pas avec des photons mais avec des électrons. Chaque point clair correspond à l'impact d'un électron sur un écran (expérience réalisée par Akira Tonomura *et al*). Les figures d'interférences deviennent d'autant plus évidentes que les électrons s'accumulent : (a) 8 électrons ; (b) 270 électrons ; (c) 2000 électrons ; (d) 60000 électrons. Les figures d'interférences suggèrent que *chaque électron interfère avec lui-même*. Tout se passe comme si l'électron (pourtant visualisé ici sous forme de *corpuscule* par son impact) était passé *par les deux fentes à la fois*.

Par conséquent, si nous cherchons à déterminer le chemin suivi par la particule, nous constatons qu'elle passe bien par une seule fente comme le ferait une bille. Elle est alors *localisée*. En revanche si nous ne cherchons pas à savoir quel chemin a été suivi entre la source et l'impact sur l'écran alors tout se passe comme si la particule empruntait *les deux chemins à la fois*, les figures d'interférence étant le témoin de ce comportement étrange. Nous retrouvons ici la dualité onde-corpuscule : si nous *ignorons* le chemin suivi par les photons, la lumière se comporte alors comme *une onde occupant tout l'espace* ; si nous cherchons à *connaître* ce chemin grâce à un moyen physique quelconque, alors la lumière se comporte comme un ensemble de *particules localisées dans l'espace*. C'est donc le *dispositif expérimental qui est responsable* du fait que la lumière nous apparaît soit comme une onde, soit comme un ensemble de particules.

Les principes de base de la physique quantique

Nous venons de faire connaissance avec certaines des « bizarreries » du monde quantique. Avant d'aller plus loin et envisager quelles nouvelles notions sont introduites par la physique quantique, faisons un rapide état des lieux de la physique à la fin du 19^{ème} siècle, avant l'avènement de la physique moderne.

En effet, à la fin du 19^{ème} siècle, deux piliers expliquent la totalité du monde physique. Ce sont d'une part la mécanique newtonienne et d'autre part l'électromagnétisme. La thermodynamique quant à elle se réduit en dernière analyse à la description statistique de l'agitation des atomes et des molécules selon les lois newtoniennes. Cette physique « classique » repose sur un certain nombre de présupposés implicites. En particulier les physiciens « classiques » considèrent de l'ordre de l'évidence que les équations de la physique décrivent le monde « en soi » et qu'il existe une relation directe entre les théories et le monde que ces dernières décrivent. Ainsi toute valeur prédite par la théorie doit trouver sa contrepartie dans la « réalité », *indépendamment de toute mesure*. De plus, pour la physique classique, tout effet a une cause locale et les objets peuvent être décrits séparément. Enfin, le fait d'éloigner les objets les uns des autres diminue leurs interactions. Ces notions ont pour conséquence une vision déterministe du monde puisque sa connaissance précise à un instant donné devrait permettre à un être omniscient la prédiction de l'état du monde à un instant futur. L'objectivité de la physique classique est également une autre de ses caractéristiques puisque l'observateur et l'objet étudié sont strictement séparés.

Avec la relativité restreinte d'Einstein, la physique classique atteint son apogée au début du 20^{ème} siècle. Les notions d'espace et de temps sont alors remises en cause afin d'expliquer les phénomènes physiques aux vitesses proches de la lumière. Mais Einstein n'en reste pas là. Ayant mis le point final de la physique dite classique, il participe à la construction des deux piliers de la physique du 20^{ème} siècle : d'une part, la relativité générale qui est une théorie de la gravitation et, d'autre part, la physique quantique (appelée théorie des quanta à son origine). Bien qu'il ait puissamment contribué à sa genèse, Einstein percevra rapidement en quoi la physique quantique est un bouleversement par rapport aux conceptions initiales de la physique, en particulier avec la remise en cause de l'idée de *localité* et par conséquent de l'idée de *causalité* (cf. encadré en fin de chapitre). Surtout l'idée que les équations de la physique quantique ne décrivent pas une « réalité en soi » le heurtera au plus haut point et il suggérera une célèbre expérience de pensée (l'expérience EPR sur laquelle nous reviendrons) destinée à démontrer qu'en dépit de ses succès expérimentaux la théorie était incomplète. En effet, Einstein reste profondément un physicien « classique » et il ne pourra admettre que toute mesure physique ne puisse

trouver sa contrepartie dans le monde « en soi » indépendamment de l'existence d'un observateur.

Parmi les principes de base de la physique quantique, la *dualité onde-corpuscule* en est un des plus fameux. Comme nous l'avons vu avec l'expérience des fentes de Young, la lumière peut *selon les conditions expérimentales* nous apparaître comme une onde ou comme des corpuscules (photons). Qu'est-elle *en réalité* ? C'est ici qu'il nous faut abandonner nos anciens réflexes et cadres de pensée. Nous devons nous faire à l'idée que la lumière nous apparaît soit comme une onde soit comme une particule mais qu'en réalité elle est les deux à la fois ou plus exactement qu'elle n'est ni l'une ni l'autre. Son apparence soit sous forme d'onde, soit sous forme de particule dépend des conditions d'observation. Il en est de même pour toutes les autres particules élémentaires. C'est peut être l'aspect le plus déstabilisant et le plus incompréhensible – au sens littéral – de la « logique » de la mécanique quantique. En effet, cette nouvelle logique du monde physique va jusqu'à remettre en cause le principe du tiers exclus auquel nous faisons référence en permanence sans en être conscient tant il est ancré dans nos neurones : une chose et son contraire ne peuvent être présentes ensemble. Et pourtant, pour la physique quantique, « A » et « non A » peuvent exister simultanément ; dans le monde quantique, une porte peut être ouverte *et* fermée. Ainsi une particule peut être « présente » à deux endroits (ou plus) à la fois ; c'est le *principe de superposition*.

Le *principe d'incertitude* (ou d'indétermination) *d'Heisenberg* sonna la fin d'une certaine vision de la science, réductionniste et déterministe. Ainsi, selon ce principe, on ne peut connaître simultanément la position et la vitesse d'une particule avec une précision extrême. Plus on affine la mesure sur sa vitesse et plus on s'interdit de connaître sa position avec précision. On peut simplement prédire la position de la particule avec une *probabilité de présence*. Il faut bien comprendre que l'existence de ce principe n'est pas liée à un défaut de précision des mesures physiques mais bien à une indétermination fondamentale qui est directement liée à l'acte de mesurer. En effet, vitesse et position n'ont pas de réalité intrinsèque en dehors d'une mesure car, selon la physique quantique, « mesurer » n'est pas un acte neutre. Toute *prise de connaissance* concernant la réalité *participe à la réalité elle-même*. On ne peut donc pas se représenter la « réalité en soi » comme nous en avons l'habitude. Tout juste peut-on se représenter la *probabilité de survenue* d'un événement dans un univers où le hasard règne en maître.

La *non localité* ou *non séparabilité* est une autre caractéristique des phénomènes décrits par la physique quantique. En effet, les objets étudiés par la physique classique sont séparés et, de plus, chaque effet est la conséquence d'une cause

locale. Cette cause locale peut être une interaction directe entre objets ou peut se faire par l'intermédiaire d'un champ. En revanche, dans le cadre de la physique quantique, les objets peuvent apparaître comme *non séparés* du fait de l'existence de connexions *non locales*. Les objets du monde quantique peuvent se révéler interdépendants *quelle que soit la distance qui les sépare*. Dans le cas de particules dites *corrélées*, on ne peut plus décrire chacune des particules séparément et une mesure sur l'une a des conséquences *instantanées* sur l'autre *comme si les deux particules ne formaient qu'une seule entité*. Ces deux particules sont dites *intriquées*. Le principe de séparabilité comme celui de causalité qui lui est associé sont donc remis en cause dans l'univers quantique. La non localité semble aller à l'encontre de la relativité restreinte qui postule que la transmission d'information ne peut se faire à une vitesse supérieure à celle de la lumière. Nous verrons toutefois que ceci n'est pas contradictoire, car ces corrélations ne peuvent être utilisées comme moyen de communiquer des informations.

La *contrafactualité* quantique défie également le sens commun. Dans certaines expériences, on montre que *des événements qui auraient pu se produire* mais qui *ne se sont pas produits* ont néanmoins une influence sur le résultat de l'expérience. Dans l'expérience des fentes de Young par exemple, l'existence d'une seconde fente modifie la place des impacts des photons, même si ceux-ci sont envoyés un par un. Tout se passe comme si le photon « connaissait » l'existence de l'autre fente. Nous verrons que ceci est en relation avec le terme d'interférence qui apparaît lorsqu'on calcule les probabilités quantiques des événements. Pour certains physiciens, la contrafactualité est une preuve en faveur du « multivers ». Selon cette interprétation de la physique quantique, toutes les valeurs possibles d'une mesure coexistent (dans des univers différents) et nous n'avons conscience que d'une seule des éventualités (voir chapitre suivant).

Ces nouvelles notions que nous avons décrites à grands traits firent bien évidemment l'objet de discussions. Elles font d'ailleurs toujours l'objet d'exégèses et nous verrons dans le chapitre suivant plusieurs « interprétations » des équations de la physique quantique, certaines étant pour le moins ébouriffantes ¹ Aussi certains physiciens qui ne parvenaient pas à admettre les conséquences de la physique quantique imaginèrent des « expériences de pensée » destinées à montrer (du moins c'est ce qu'ils espéraient) à quelles

¹ A noter que ces notions sont nettement plus déroutantes pour le « bon sens » que l'aurait été une éventuelle « mémoire de l'eau ». Mais l'idée de cette dernière avait pris naissance dans le monde des biologistes et comme le fit remarquer J. Benveniste : « *Je ne savais pas alors que les physiciens qui touchent à l'infini ont droit au rêve et pas ces savants mous que sont les biologistes !* » (J. Benveniste. Le rêve interdit. *Le Monde*, 12 juillet 1989) (*ADM 1 Chapitre 14*).

absurdités conduisait cette théorie si on la laissait en l'état. Ces physiciens pensaient que la physique quantique devait être modifiée pour aboutir à une version qui nous donnerait une vision du monde physique qui soit « compréhensible » et plus acceptable pour nos esprits. Jusqu'à présent toutefois, la physique quantique a toujours triomphé des épreuves et a toujours été confirmée par les expériences destinées à la mettre à l'épreuve. Quelques-unes des expériences de pensée ont conduit à de véritables expérimentations « en dur » qui ont confirmé l'étrangeté intrinsèque de la nouvelle physique. Il faut noter par ailleurs que de nombreux physiciens ou ingénieurs utilisent quotidiennement les équations de la physique quantique sans se poser de questions concernant leurs bases ontologiques et leurs conséquences « philosophiques ».

Certaines de ces expériences de pensée sont célèbres et il est difficile de ne pas les mentionner. Elles illustrent bien d'ailleurs les bizarreries auxquelles nous devons nous habituer si nous souhaitons avancer dans la compréhension du monde physique. Nous décrirons ainsi l'expérience du chat de Schrödinger et le paradoxe EPR.

L'inévitable chat d'un célèbre physicien

La description de l'expérience de pensée dite du « chat de Schrödinger » est un passage obligé de toute description de la réalité quantique. Cette expérience – qui couple la réalité du monde microscopique à celle de notre monde macroscopique – fut imaginée en 1935 et elle était destinée à l'origine à montrer que la description selon une conception orthodoxe de la physique quantique conduisait à des paradoxes. Avec cette expérience, Schrödinger souhaitait souligner les insuffisances de l'interprétation dite orthodoxe de la nouvelle physique, nommée également interprétation de Copenhague. Cette expérience pose également les bases de ce que l'on appelle le « problème de la mesure » sur lequel nous reviendrons par la suite.

Schrödinger imagine donc l'expérience suivante. Un chat se trouve enfermé dans une enceinte contenant un atome radioactif qui – dans le temps imparti à l'expérience – a une chance sur deux de se désintégrer et d'émettre une particule. Un compteur de radioactivité qui permet de mesurer l'émission de cette particule est situé dans l'enceinte. Lorsque la particule est détectée, le dispositif actionne un marteau qui brise une fiole contenant un poison volatil mortel pour le chat.

Selon le formalisme de la physique quantique, en dehors d'une mesure, l'atome est dans un état qui est la somme (plus exactement c'est une somme vectorielle ; cf. section suivante) de l'état désintégré et de l'état non désintégré : la

particule radioactive est alors dans un état que l'on dit *superposé*. Le dispositif lui-même est alors dans un état superposé : déclenché *et* non déclenché. Par conséquent en conclut Schrödinger, tant que quelqu'un ne regarde pas dans quel état est le chat, ce dernier est dans un état superposé : vivant *et* mort.¹

Pour simplifier, on considère dans cette expérience que le chat n'a pas de conscience et qu'il ne peut donc pas être considéré comme un « observateur ». Néanmoins le physicien Wigner imagina précisément de faire intervenir dans cette expérience de pensée deux êtres dont l'état de conscience pouvait être tenu pour certain : lui-même et l'un de ses amis.

L'ami de Wigner

Cette expérience de pensée est dans le prolongement de celle du chat de Schrödinger. En décrivant cette situation expérimentale, Wigner souhaitait pointer du doigt le rôle que semble jouer la prise de conscience du résultat par un observateur dans la description des phénomènes quantiques.

Wigner imagine qu'il enferme un de ses amis avec le chat de Schrödinger ! Bien entendu l'expérience est faite de façon à ce que le (cruel) dispositif de mise à mort aléatoire du chat ne risque pas d'atteindre l'ami lui-même... L'intérêt d'introduire cet ami est de permettre à Wigner de communiquer avec lui à la fin de l'expérience pour commenter les résultats et échanger leurs impressions. L'ami s'enferme donc dans la même pièce que le chat dont la vie est suspendue à une particule en état instable et il observe le déroulement de l'expérience. Rappelons que si la particule se désintègre durant le temps imparti, alors un dispositif détecte cette désintégration est déclenche un dispositif qui provoque la mort du chat ; si la particule ne se désintègre pas, alors le chat reste vivant.

Au moment de prendre connaissance de l'état du chat, du point de Wigner, le système formé par le chat et son ami est dans l'état superposé : « dispositif non déclenché » + « chat vivant » + « ami constatant que le chat est vivant » ou bien « dispositif déclenché » + « chat mort » + « ami constatant que le chat est mort ». A la fin de l'expérience, Wigner pénètre dans la pièce et effectivement c'est bien l'une des deux branches qu'il observe. Un problème se pose toutefois. Du point de vue de Wigner, c'est au moment où il prend connaissance du résultat de l'expérience qu'a lieu la « réduction de la fonction d'onde ». S'il interroge son ami, ce dernier lui dira qu'il a constaté que le chat était vivant (ou mort) bien avant que Wigner n'ouvre la porte et vienne s'enquérir du résultat.

¹ On dit fréquemment qu'un système quantique peut être dans plusieurs états à la fois. Il est plus correct de dire que le système est dans *un état quantique unique* mais que la mesure du système peut conduire à plusieurs résultats différents (chacun de ces résultats ayant sa propre probabilité).

Du point de vue de l'ami, nous pouvons comprendre que ce dernier ne se soit jamais senti dans un état superposé. Mais ceci signifie également que pour l'ami, la réduction de la fonction d'onde a eu lieu avant que Wigner prenne connaissance du résultat. Tout se passe comme si l'observation par non seulement faisait émerger l'un des résultats possible mais produisait également un passé cohérent avec l'observation présente.

Imaginons maintenant qu'à la place du chat et de l'ami, on place simplement un dispositif lumineux qui s'allume si la particule radioactive s'est désintégrée. Dans ce cas nous serions plus enclins à admettre que le dispositif expérimental est bien dans un état superposé avant que Wigner prenne connaissance du résultat. La différence avec la situation précédente est que dans ce cas nous avons affaire à un dispositif inerte non conscient. C'est ce point que Wigner souhaitait mettre en évidence. La conscience semble bien jouer un rôle particulier. La chaîne de causalité atome désintégré (ou non) → dispositif déclenché (ou non) → chat mort (ou non) → ami observant le chat mort (ou non) semble s'arrêter là où une conscience observe le résultat et, d'une certaine façon, résout la superposition en l'une des branches possibles de la réalité.

Les pérégrinations d'un chat dans l'espace de Hilbert

Les physiciens quantiques utilisent pour leurs calculs un espace particulier appelé espace de Hilbert. Il s'agit d'un espace vectoriel dont les dimensions ne sont pas limitées. Il peut par conséquent avoir un nombre de dimensions bien supérieur aux trois dimensions habituelles de l'espace euclidien que nous connaissons et dans lequel nous avons l'habitude d'inscrire nos actions quotidiennes. De plus l'espace de Hilbert est défini sur l'ensemble des nombres complexes. Inutile de dire qu'essayer de se représenter concrètement cet espace n'est guère aisé ! Pourtant, c'est dans ce dernier que les physiciens définissent des « vecteurs d'état » similaires aux vecteurs des espaces vectoriels habituels. L'état d'un paramètre (appelé « observable ») d'un système donné est représenté par un vecteur d'état (noté $|x\rangle$) dont les « valeurs propres » constituent la liste des résultats possibles lors d'une mesure donnée.

Prenons un exemple. Supposons que l'on cherche à mesurer le spin d'un électron selon un axe donné.¹ Nous savons que sa valeur est soit positive, soit négative (avec la même probabilité). Nous représentons par conséquent l'état de l'électron (en ce qui concerne son spin) par la somme de deux vecteurs (les vecteurs peuvent en effet s'additionner) :

¹ Le spin peut être assimilé en première approximation à la rotation de la particule sur elle-même. Nous pouvons l'imaginer comme un petit aimant dont un pôle pointe dans une direction et le pôle opposé pointe dans la direction opposée.

$$|\psi_E\rangle = a|+\rangle + b|-\rangle$$

On dit alors que l'électron est dans un état *superposé* : les deux états spin positif *et* spin négatif sont tous les deux possibles. Nous devons bien comprendre que tout se passe comme si c'était l'opération de mesure qui « obligeait » l'électron à prendre une valeur définie : spin positif *ou* spin négatif. Le « basculement » vers l'état spin positif ou vers l'état spin négatif est appelé « réduction de la fonction d'onde » (ou encore « réduction du paquet d'onde »). Ce choix se fait au hasard : la probabilité de mesurer un spin positif est a^2 et la probabilité de mesurer un spin négatif est b^2 (avec $a^2 + b^2 = 1$).

Par ailleurs, dès lors que des états de deux objets sont observés ensemble (par exemple après une interaction, une mesure), on dit, selon le formalisme de la physique quantique, qu'ils sont *intriqués* (on dit aussi enchevêtrés ou entremêlés). Ainsi deux particules qui ont interagi sont dites intriquées car le résultat de la mesure de l'une est corrélé au résultat de la mesure de l'autre et ceci *quelle que soit la distance qui les sépare*. Tout se passe comme si ces deux particules ne formaient plus qu'une seule entité *non séparable*. De même, un appareil de mesure A qui interagit avec un objet quantique E conduit à une intrication de l'objet quantique et de l'appareil de mesure. On est alors conduit à considérer que l'appareil de mesure et l'objet mesuré ne sont pas indépendants et il faut considérer le système AE comme *un système unique non séparable*.

L'intrication de deux systèmes se représente de la façon suivante. Supposons l'état d'un premier système noté $|\psi_1\rangle$ dans l'espace de Hilbert et $|\psi_2\rangle$ l'état du deuxième système. Dans le formalisme de la physique quantique, un état d'intrication se représente par un *produit* des deux vecteurs (appelé produit tensoriel). L'état final des systèmes 1 et 2 se représente alors par :

$$|\psi_{1+2}\rangle = |\psi_1\rangle|\psi_2\rangle$$

Si nous revenons au chat de Schrödinger voyons comment le « paradoxe » pourrait être représenté avec ce formalisme (très simplifié ici). Tout d'abord l'atome radioactif A est au début de l'expérience dans un état superposé. En effet il est dans l'état superposé « atome désintégré » ($A_{dés.}$) *et* « atome non désintégré » ($A_{non\ dés.}$). Ce que l'on note en représentation vectorielle :

$$|\psi_A\rangle = a|A_{non\ dés.}\rangle + b|A_{dés.}\rangle$$

De la même façon, le dispositif intermédiaire S destiné à libérer le poison volatil est dans un état $D_{décl.}$ ou $D_{non\ décl.}$ selon que le système a été ou non déclenché par la détection de la particule émise du fait de la désintégration de l'atome. On dit que le dispositif est « intriqué » avec l'électron. Le chat lui-même

est dans l'état mort (C_{mort}) ou vivant (C_{vivant}) selon qu'il a inhalé ou non le poison. Selon le formalisme quantique, l'état de ce grand système est représenté par le vecteur suivant :

$$|\psi_{ADC}\rangle = a|C_{vivant}\rangle|D_{non\ décl.}\rangle|A_{non\ dés.}\rangle + b|C_{mort}\rangle|D_{décl.}\rangle|A_{dés.}\rangle$$

La fonction d'onde qui représente ce grand système dans l'espace de Hilbert est donc la superposition de l'état 1 (atome non désintégré, dispositif non déclenché, chat vivant) *et* de l'état 2 (atome désintégré, dispositif déclenché, chat mort). On peut y ajouter un observateur également dans l'état superposé ayant observé le chat mort *et* ayant observé le chat vivant. Ce déplacement de l'étrangeté du monde microscopique vers le monde macroscopique est donc le propos du paradoxe du chat de Schrödinger qui plus de 70 ans après son « invention » continue de susciter des discussions passionnées.

L'expérience EPR

L'expérience EPR (souvent associée à l'idée de « paradoxe ») est une expérience de pensée qui est centrale dans la genèse des idées de la physique quantique. Imaginée par Einstein et deux de ses élèves Podolsky et Rosen (d'où l'acronyme EPR), elle avait pour but de montrer que la physique quantique était au mieux incomplète et au pire erronée.

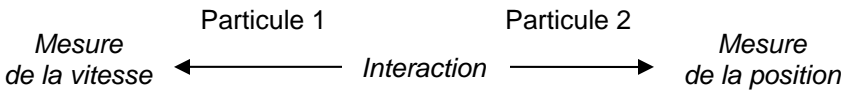


Figure 16. L'expérience de pensée EPR. Deux particules ont interagi et s'éloignent l'une de l'autre. Pour la physique quantique elles constituent un « tout indivisible »¹ sans qu'il soit nécessaire de faire appel à des « variables cachées » pour expliquer les résultats d'éventuelles futures mesures.

Imaginons, disent les trois physiciens, que deux objets quantiques (particules) ayant interagi s'éloignent l'un de l'autre. Selon la physique quantique les deux particules sont décrites par une fonction d'onde unique qui traduit

¹ L'expression de « tout indivisible », bien que fréquemment trouvée sous la plume de physiciens, n'est toutefois pas très heureuse car elle oblige à considérer *deux* objets séparés comme *un seul* objet. Dans ce cas que devient la notion même d'objet qui implique une séparation avec le reste du monde ?

certaines lois de conservation. Supposons maintenant que l'on mesure la vitesse de l'une des particules et la position de l'autre. Or, du fait de ces lois de conservation, la connaissance de la vitesse de l'une implique la connaissance de la vitesse de l'autre, *sans la mesurer*; de même pour la position.¹ De plus, poursuivent les détracteurs de la physique quantique, si l'on peut admettre à la rigueur que la mesure fixe la valeur mesurée pour la première particule, on ne peut admettre que la valeur de la seconde soit alors *instantanément* fixée. La deuxième particule peut en effet se trouver à une distance astronomique de la première; or, la relativité restreinte s'oppose de façon catégorique à ce qu'une information voyage plus vite que la lumière. C'est déjà difficile à admettre, mais en fait l'opposition d'Einstein porte surtout sur notre conception de ce que doit être une théorie physique et sur ce qu'elle est censée décrire concernant ce que nous appelons la « réalité physique ». Le texte des trois physiciens définit donc les conditions minimales pour que « quelque chose » soit considéré comme appartenant à la réalité physique :

« Si, sans perturber en aucune manière l'état d'un système, on peut prédire avec certitude la valeur d'une quantité physique de ce système, alors il existe un élément de réalité correspondant à cette quantité physique »

En d'autres termes, si une propriété physique d'un objet peut être connue *sans être observée*, alors cette propriété ne peut pas avoir été créée par l'observation. Et si elle n'a pas été créée par l'observation, c'est donc bien qu'elle existait en tant que réalité physique *avant* son observation. Or c'est bien ce qui se passe au cours de l'expérience EPR : nous pouvons connaître la vitesse de l'une des particules sans avoir eu besoin de la mesurer. C'est donc bien la preuve, selon Einstein et ses collaborateurs, que vitesse et position sont définies *avant la mesure*. Ils concluent qu'il existe des « *variables cachées* » dont la physique quantique ne rend pas compte ; cette théorie est donc incomplète.

La réponse de Bohr et des physiciens de l'Ecole de Copenhague au « paradoxe » EPR fut en substance que l'on ne doit pas faire d'hypothèses sur l'état des particules (ou de tout système quantique en général) *en dehors d'une mesure* car nous n'avons pas de preuve que cet état « existe » d'une quelconque façon. Ce que nous attribuons en propre à l'objet mesuré (la vitesse ou la position) est en fait une propriété de *l'ensemble* que forment l'objet lui-même et l'appareil de mesure. Nous devons – toujours selon ces physiciens – nous en tenir aux équations de la physique qui ne décrivent pas la réalité telle qu'elle est mais décrivent la *connaissance* que nous avons de cette dernière. Les équations

¹ De même si deux électrons interagissent : quand ils se rapprochent, leurs spins pointent dans des directions opposées quand ils s'éloignent à nouveau, comme le feraient de petits aimants dont les pôles nord et sud s'attirent.

nous permettent de faire des *prédictions* et c'est tout ce que l'on doit demander à la physique. En demander plus ce serait faire – au sens propre – de la métaphysique et sortir du rôle imparti à la science. Pour résumer, on pourrait dire que selon Bohr il n'y a pas de réalité en dehors d'une mesure ou plus exactement qu'il est vain de chercher à s'interroger sur la nature d'un paramètre en dehors d'une mesure. Quant à l'argument de l'information qui voyage plus vite que la lumière, Bohr fit remarquer que l'on ne pouvait transmettre d'information *utile* selon ce procédé car les valeurs mesurées sont aléatoires (même si elles sont corrélées) et on ne peut agir sur ce processus.

Mais, pour Einstein, cette façon de considérer la physique est une vision insatisfaisante de la science qui, selon lui, se doit de décrire la réalité *telle qu'elle est*. On doit pouvoir attribuer aux différents paramètres d'un système des valeurs *indépendamment des mesures* qui ont permis de les déterminer. Si dans cette expérience de pensée nous parvenons à une absurdité, c'est que la théorie quantique est incomplète et qu'il lui manque des variables (qui sont « cachées »). On peut imaginer en effet que les particules « emportent » l'information concernant leur direction ou la valeur de leur spin, par exemple. Au moment où la mesure est faite l'appareil de mesure tiendrait alors compte de ces « variables cachées » et le choix de la valeur mesurée se ferait en conformité avec cette information. Pour les tenants de l'interprétation de Copenhague, la théorie quantique doit être considérée comme complète et il est inutile de la compliquer avec des variables supplémentaires uniquement pour se conformer à l'idée *a priori* que nous nous faisons de la réalité. C'est selon eux retomber à nouveau dans la métaphysique.

Pendant plusieurs décennies cette expérience resta au stade d'expérience de pensée. Il est en effet difficile de faire des mesures sur les deux particules corrélées d'une unique paire. Le plus souvent les physiciens travaillent sur des ensembles statistiques de particules. La question est donc restée sans espoir de réponse jusqu'en 1964 lorsque le physicien John Bell proposa une démarche qui suggérait une possibilité de trancher le débat expérimentalement. Cette proposition peut se résumer dans une inégalité. Sans entrer dans le détail, l'inégalité de Bell (dont il existe en fait plusieurs formulations) est fondée sur une propriété mathématique que doivent respecter les mesures d'une population de particules si on suppose vraie une théorie à variable cachée « à la Einstein » (i.e., une théorie tout à la fois réaliste et locale), à savoir que les particules emportent quelque part avec elles une information sur la propriété mesurée. Si comme le pensait Bohr, les lois de la physique quantique sont complètes, alors il n'existe pas de variables cachées et cette inégalité devrait être violée.

La question est maintenant tranchée expérimentalement de façon convaincante depuis 1982 avec l'expérience d'Alain Aspect de l'Institut d'optique d'Orsay. Cette expérience a été la première à montrer de façon convaincante que l'inégalité de Bell était violée. Par conséquent, les conceptions de l'École de Copenhague l'emportaient sur la vision d'un monde « à la Einstein », c'est-à-dire reposant sur des théories « à variables cachées ». De plus, le résultat expérimental obtenu dans ces expériences était celui que prédisait la théorie quantique avec une précision très grande. Par conséquent non seulement la non localité était révélée par ces expériences mais en plus la mécanique quantique en sortait renforcée.

Le résultat des expériences d'Aspect (couplé aux travaux de John Bell) est peut-être le résultat scientifique le plus important du 20^{ème} siècle. Depuis l'expérience *princeps* de 1982, ce résultat a depuis été largement confirmé. De plus, si dans l'expérience initiale les mesures étaient réalisées sur des particules corrélées éloignées d'une douzaine de mètres, c'est maintenant sur des particules distantes de plusieurs kilomètres que les physiciens travaillent.

La controverse Bohr-Einstein prenait donc fin avec la victoire de Bohr. L'expérience avait tranché : il était inutile de faire appel à des variables cachées. Ce n'est donc plus une option philosophique parmi d'autres : nous savons maintenant que nous sommes plongés dans un *monde non local* (même si notre monde macroscopique nous *apparaît* local et déterministe).

Ces expériences qui mettaient fin aux questions sur l'expérience de pensée EPR n'étaient pas que théoriques. En effet, reprenant les principes de l'expérience d'Aspect, certains physiciens eurent l'idée de mettre à profit la superposition quantique pour l'utiliser dans des dispositifs permettant de transmettre des messages de façon cryptée. L'état superposé des particules pourrait également mener à la construction d'ordinateurs quantiques fondés sur une nouvelle logique. Mais ceci est une autre histoire. Voyons maintenant comment physiciens et philosophes interprètent les « paradoxes » de la physique quantique.



Localité et non localité en physique

Les « effets à distance » ont toujours été source de méfiance chez les scientifiques, en particulier chez les physiciens. Ceci doit probablement être lié au caractère en apparence « magique » d'un tel effet. Dès qu'un effet semblait s'expliquer par une action à distance, les physiciens n'ont eu de cesse de faire en sorte de montrer que l'action à distance n'était qu'une illusion et qu'en fait il s'agissait bien d'événements locaux qui étaient à l'œuvre.

C'est ainsi que Descartes imagina que l'attraction entre planètes était due à des tourbillons microscopiques qui s'influençaient de proche en proche (idée de localité) et transmettaient ainsi la « force gravitationnelle ». Le génie de Newton fut de ne pas faire d'hypothèse sur les mécanismes sous-jacents concernant l'étrange attraction des corps pesants (« *hypotheses non fingo* ») et d'en énoncer des lois uniquement descriptives. Descartes fut en un sens plus « physicien » que Newton dans son approche de la gravitation mais l'Histoire et la physique ont donné raison à ce dernier. Et ce fut Einstein qui compléta l'œuvre de Newton en proposant dans le cadre de la relativité générale que l'attraction gravitationnelle était liée à une courbure locale de l'espace. Il réconcilia ainsi la loi d'action à distance de Newton et l'aversion naturelle des physiciens pour tout ce qui pouvait évoquer une action « magique » à distance.

Dans le domaine de l'électromagnétisme, on assista à la même démarche. Qui n'a jamais été fasciné en effet par l'action mutuelle de petits aimants ou par des fragments de papier qui sautillent sous l'influence d'un corps électrisé ? Ici également cette apparente action à distance fut en définitive décrite par les physiciens comme la conséquence de l'action d'un champ permettant ici aussi d'écarter l'idée d'action à distance. Ce n'était plus en effet deux objets qui interagissaient à distance mais un champ qui se manifestait localement.

Dans le cas de la non localité quantique, toutefois, le problème est tout autre et l'apparente action à distance n'a pu être réduite par un quelconque artifice comme l'espéraient les tenants des théories à variables cachées locales. Einstein avait proposé l'expérience de pensée EPR pour précisément bien mettre en évidence ce qu'il ne pouvait admettre parlant à ce sujet de « *spooky action at a distance* ».

Certaines des interprétations de la physique quantique (Everett, Rovelli, QBism) permettent de s'affranchir de la notion de non localité ; il existe néanmoins un « prix à payer » (mondes multiples, relativisation de l'observation).