

Séance du 28 octobre 2013

Les lois étranges de la mécanique quantique et leur impact sur notre conception du monde physique

par Jean-Pierre NOUGIER

MOTS CLÉS

Mécanique quantique - Lumière : représentation - Heisenberg : principe d'incertitude - Planck : principe de quantification - Orbitale électronique - Intrication - Téléportation.

RÉSUMÉ

Dans une précédente conférence, une analogie avait été faite entre certaines propriétés des objets quantiques et celles que l'on retrouvait en science-fiction. Dans la présente communication, on explique de façon simple les principaux postulats de la mécanique quantique, on montre combien sont déroutants pour le sens commun les effets induits par ces lois étranges. Ce texte en même temps complète et précise une autre communication montrant que la vérité scientifique n'est pas une notion absolue mais qu'elle dépend essentiellement du modèle utilisé pour représenter les phénomènes physiques.

I – Introduction

La mécanique est la partie de la physique qui étudie le mouvement (ou l'équilibre) des corps.

Les lois usuelles de la physique sont, du moins en apparence, empreintes du sceau du "bon sens", dans la mesure où nous y sommes confrontés quotidiennement, de sorte que nous y sommes habitués et que nous considérons leurs effets comme "normaux", voire prévisibles. Il en est ainsi des lois de la mécanique classique, appelée encore "mécanique newtonienne", qui décrit le mouvement des corps à l'échelle humaine, mais qui s'applique aussi bien au delà, par exemple aux mouvements des corps célestes.

Or au début du XX^e siècle, l'étude des particules élémentaires allait montrer que le mouvement de celles-ci obéit à des lois totalement différentes de celles de la mécanique classique, et que l'on allait dénommer "mécanique quantique". Ces lois sont si déroutantes qu'elles modifient totalement notre conception du monde physique. On ne répètera jamais assez combien sont dignes d'admiration ceux qui ont osé jeter les fondements et poser les principes de la mécanique quantique, alors même qu'ils étaient en contradiction avec leurs propres convictions, à un point tel que par exemple Albert Einstein lui-même, qui fut pourtant l'un des fondateurs de cette théorie, n'en a pas compris certains aspects jusqu'à la fin de sa vie.

J'ai déjà abordé dans de précédentes conférences certains aspects de ces étranges lois, les mettant en parallèle avec des récits de science-fiction (1), ou montrant, en m'appuyant sur l'exemple de la lumière, que le concept de réalité n'est pas une notion intrinsèque mais dépend du modèle que nous adoptons pour rendre compte des résultats expérimentaux (2). Le but de la présente communication est :

- de tenter d'expliquer de façon simple les principaux postulats de la mécanique quantique,
- de montrer combien certaines des lois qui en découlent sont déroutantes et heurtent encore la conception que nous nous faisons habituellement du monde physique, plus d'un siècle après leur découverte : à défaut de les comprendre, il faut pourtant bien les admettre, car elles n'ont jamais été mises en défaut, malgré les milliers d'expériences en tous genres qui les ont testées.
- de préciser la notion de réalité-modèle-dépendant qui de nos jours se substitue à celle de réalité-vérité.

Nous nous appuyerons pour cela sur la conception que nous nous faisons de la lumière, phénomène courant et banal s'il en est, et dont cependant la nature profonde pose encore à ce jour de nombreux problèmes.

II – Ondes et particules : “to be or not to be ?”

Depuis l'antiquité s'est posée la question de savoir quelle était la nature de la lumière. A la fin du XIX^e siècle, à la suite notamment des travaux d'Augustin Jean Fresnel (1788-1827), fondateur de l'optique physique moderne, et de James Clerk Maxwell (1831-1879) qui dans les années 1860 a posé les équations fondamentales de l'électromagnétisme, il était clair que la lumière était une onde électromagnétique, En effet, seule la théorie ondulatoire permet d'expliquer les expériences d'interférences et de diffraction : lorsque l'on superpose deux ou plusieurs ondes cohérentes, par exemples issues d'une même source, en certains points de l'espace leurs amplitudes sont de même signe, elles s'ajoutent, ces points sont brillants, l'ensemble des points brillants sont alignés suivant des lignes brillantes, appelées franges d'interférences constructives ; en d'autres points, une onde a une amplitude positive, l'autre une amplitude négative, ces deux amplitudes s'annulent, ces points sont alignés suivant des franges sombres, d'interférence destructive. Ainsi on observe une succession alternée de franges sombres et de franges brillantes (figure 1).

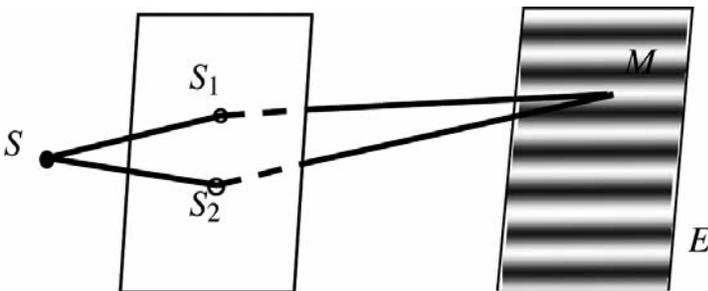


Figure 1 : Expérience d'interférences schématisée

Il est aisé d'observer des interférences lumineuses : il suffit par exemple de regarder un lampadaire à travers un voile, on voit une figure d'interférences ; un autre exemple est constitué par les très belles irisations que l'on voit lorsque la lumière se réfléchit sur les stries constituées par les pistes d'un compact disque : en certaines régions la lumière rouge par exemple est en interférences destructives (= absence de couleur rouge) et le vert par exemple en interférences constructives, cette zone apparaît de couleur verte ; ailleurs c'est le contraire, la zone correspondante apparaît de couleur rouge.

Or en 1887 Rudolph Hertz (célèbre par la découverte des ondes hertziennes) et son élève Philipp von Lenard découvrent l'effet photoélectrique. Au début du XX^e siècle, Max Planck (1858-1947) étudie le rayonnement du corps noir et en déduit que la lumière semble arriver par paquets d'énergie, chaque paquet apportant une énergie proportionnelle à la fréquence, le facteur de proportionnalité h a depuis été appelé constante de Planck. En 1905, Albert Einstein réalise que ces deux observations, effet photoélectrique et rayonnement du corps noir, étaient deux aspects d'un même phénomène : il affirme que la lumière, considérée alors comme une onde, est aussi une particule (le photon). Ces résultats suscitèrent une immense controverse chez les physiciens. Ainsi Robert Millikan passa 12 ans de sa vie à imaginer des expériences afin de contredire la théorie d'Einstein, pour conclure en fin de compte qu'Einstein avait raison (Millikan a par ailleurs obtenu le prix Nobel de physique en 1923 pour sa découverte de la valeur de la charge de l'électron). Aujourd'hui, la réalité de l'effet photoélectrique ne fait plus aucun doute pour personne, c'est ce phénomène qui est à la base du fonctionnement des cellules et photopiles solaires, qui permettent entre autres de produire de l'énergie électrique : de même qu'un boulet de canon, en percutant un mur, en arrache des éclats de pierre, de même une particule de lumière (ou photon) en percutant un atome de métal en arrache des électrons, qui en circulant créent un courant électrique. Les physiciens étaient déconcertés que la lumière se présente tantôt comme une onde, tantôt comme une particule. Ce double aspect est conforté en 1925 par Louis de Broglie (1892-1987) qui émet l'hypothèse que la dualité entre le rayonnement électromagnétique et les photons s'applique à toute onde et réciproquement à toute particule, en particulier aux électrons. Ceci était expérimentalement confirmé en 1927 par Davison et Germer qui ont pu faire diffracter un faisceau d'électrons sur un monocristal, confirmant la nature ondulatoire de l'électron.

On a parlé désormais de "dualité onde-corpuscule", admettant que dans certaines circonstances un objet pouvait se comporter comme une onde, dans d'autres circonstances comme une particule. Finalement, la lumière est-elle une onde ou une particule (photon) ? Les deux à la fois, ou plus exactement ni l'un ni l'autre, comme je l'ai commenté dans une précédente communication à l'Académie des Sciences et Lettres de Montpellier ⁽¹⁾ : l'aspect ondulatoire et l'aspect corpusculaire ne sont que deux *représentations* de la lumière, dont la nature profonde nous est inconnue, de même qu'un tableau de peinture et le morceau de musique qui seraient composés par le même artiste ne sont que deux *représentations* de l'état d'âme de l'artiste, ils ne *sont* en aucune manière son état d'âme qui nous reste inconnu.

III – Le principe d’incertitude de Heisenberg et quelques conséquences

Énoncé du principe

Le principe d’incertitude de Heisenberg, énoncé en 1927, stipule qu’il est impossible de connaître exactement à la fois la position et la vitesse d’une particule. De façon plus précise, à une dimension, si l’on désigne par Δx l’incertitude sur la position de la particule et par Δv l’incertitude sur sa vitesse, ces deux quantités sont liées par la relation :

$$\Delta x \cdot \Delta v \geq \hbar/2 \quad (3.1)$$

où m est la masse de la particule et \hbar est la constante de Planck h divisée par 2π . La relation (3.1) est en fait un cas particulier d’une relation plus générale entre observables qui ne commutent pas. Dans le système international d’unités, compte tenu de ce que $h = 6,62 \times 10^{-34}$, la relation (3.1) s’écrit :

$$m \Delta x \Delta v \geq 0,53 \times 10^{-34} \quad (3.2)$$

Le principe d’incertitude de Heisenberg défie le sens commun : lorsqu’un objet se déplace sur la Terre ou dans l’Espace, on sait qu’il est possible à tout instant de déterminer sa position et sa vitesse : c’est la raison pour laquelle on peut prévoir avec une extrême précision les positions des planètes, les éclipses de lune ou de soleil, on sait qu’il est possible d’envoyer des satellites ou des sondes spatiales à des millions de kilomètres de la Terre pour les mettre en orbite autour de telle ou telle planète, au cours de voyages pouvant durer plusieurs années. Il semble donc qu’il y ait incompatibilité entre les lois de la vie courante et celles de la mécanique quantique.

Nous allons voir que ce n’est pas le cas. La raison en est que :

- pour les objets habituels, la masse m est importante, de sorte que le premier membre de (3.2) est bien plus grand que le second, donc le principe de Heisenberg est satisfait, même si les incertitudes Δx et Δv sur la position et sur la vitesse sont faibles ;
- pour les particules élémentaires, la masse est si faible ($m = 0,9 \times 10^{-30}$ kg pour l’électron) que le premier membre de (3.2) devient plus petit que le second membre, donc le principe de Heisenberg ne peut être respecté que si les incertitudes Δx et Δv sur la position et sur la vitesse sont grandes, ce qui signifie qu’on ne peut pas connaître avec une bonne précision à la fois la vitesse et la position de la particule.

Le défi du tennisman atomique

On sait que, pour frapper correctement dans la balle, le joueur de tennis doit apprécier “exactement” à la fois, bien évidemment sa position (sinon il envoie sa raquette là où la balle n’est pas) mais aussi sa vitesse : si la balle va moins vite que ce qu’il croit, il frappe dans le vide avant que la balle n’arrive, et si elle va plus vite que ce qu’il croit, la balle est déjà passée lorsqu’il frappe avec sa raquette. Ces conditions sont-elles compatibles avec le principe d’incertitude de Heisenberg ?

Cas du joueur de tennis humain

Considérons une balle de tennis de diamètre 6,5 cm, de masse $57 \text{ g} = 57 \times 10^{-3} \text{ kg}$, se déplaçant à 180 km/heure soit 50 m/s. Dire que le tennisman apprécie correctement la position de la balle signifie qu'il est capable de la localiser avec une précision bien meilleure que son diamètre, prenons par exemple une incertitude sur la position d'un dixième de millimètre, soit $\Delta x = 10^{-4} \text{ m}$. De même s'il apprécie correctement sa vitesse, cela signifie que l'incertitude sur la vitesse est très faible devant la vitesse elle-même, prenons par exemple 1/1000 de la vitesse, soit $\Delta v = 5 \text{ cm/s} = 5 \times 10^{-2} \text{ m/s}$. Il en résulte que :

$$m \Delta x \Delta v = (57 \times 10^{-3})(10^{-4})(5 \times 10^{-2}) = 2,85 \times 10^{-11}$$

cette quantité est très largement supérieure à $\hbar/2 = 0,53 \times 10^{-34}$, par conséquent le principe d'incertitude de Heisenberg [équation (3.2)] est satisfait.

Cas du tennisman atomique

Imaginons maintenant un tennisman de dimensions atomiques qui voudrait jouer au tennis avec un électron comme balle. Nous connaissons tous le modèle de Bohr, qui assimile l'atome à un système planétaire dont le noyau occuperait le centre et où les électrons seraient assimilables aux planètes gravitant autour du noyau. Ce modèle permet en particulier de prédire avec une très bonne approximation le spectre de raies de l'atome d'hydrogène, constitué d'un proton et d'un électron qui gravite autour. Ce modèle prédit que, dans son état fondamental, l'électron décrit autour du noyau d'hydrogène une orbite circulaire de rayon $r = 10^{-10} \text{ m}$ avec une vitesse $v = 1,6 \times 10^6 \text{ m/s}$. Dire que la position de l'électron est connue signifie que l'incertitude Δx le long de sa trajectoire est faible devant la longueur de la trajectoire, ou encore devant son rayon : prenons par exemple une précision de 1/10 du rayon, soit $\Delta x = 10^{-11} \text{ m}$. De même connaître la vitesse signifie que l'incertitude sur la vitesse est bien plus petite que la vitesse, disons 1/10 de la vitesse soit $\Delta v = 1,6 \times 10^6 \text{ m/s}$. La masse de l'électron valant $m = 0,9 \times 10^{-30} \text{ kg}$, le premier membre de l'équation (3.2) vaut :

$$m \Delta x \Delta v = (0,9 \times 10^{-30})(10^{-11})(1,6 \times 10^6) = 1,44 \times 10^{-35} = 0,144 \times 10^{-34}$$

On voit que cette quantité est plus petite que le second membre de (3.2), donc le principe d'incertitude de Heisenberg n'est pas satisfait : le tennisman atomique ne pourrait jamais frapper correctement un électron avec sa raquette !

Étudions maintenant quelques conséquences de ce principe.

La lumière ne voyage pas en ligne droite

On sait qu'en mécanique classique, un corps qui n'est soumis à aucune force se déplace d'un mouvement rectiligne uniforme. Ainsi dans un milieu homogène la lumière se propage en ligne droite (en réalité, elle suit la courbure de l'espace, qu'on peut tout à fait négliger dans les conditions habituelles sur des distances "courtes"). Ceci n'est plus vrai en mécanique quantique : en effet, si un corpuscule quantique (un photon par exemple, ou un électron) se déplaçait d'un mouvement rectiligne uniforme dans la direction x , on en déduirait que suivant une direction perpendiculaire y sa position serait $y = 0$ et sa vitesse dans la direction y serait aussi nulle, on connaîtrait donc exactement à la fois sa position et sa vitesse dans la direction y , ce qui est impossible d'après le principe d'incertitude de Heisenberg : ainsi à l'échelle quantique, la nature ignore la ligne droite. Plus précisément, même si le photon se

propage en ligne droite, sa trajectoire ne peut pas être mesurée, elle n'apparaît donc pas comme une ligne droite. En conséquence, la trajectoire du photon apparaît comme fluctuant de façon aléatoire autour d'une ligne droite. Ces fluctuations quantiques sont intrinsèques, et n'ont rien à voir avec de quelconques collisions qui dévieraient le photon de sa trajectoire. Il en est d'ailleurs de même pour toute particule. Cependant ces déviations sont si infimes qu'elles sont imperceptibles à l'échelle humaine.

Les orbitales électroniques

Plus généralement la trajectoire d'une particule quantique ne peut pas être une ligne continue, sinon dans une direction perpendiculaire à cette trajectoire on connaîtrait exactement sa position et sa vitesse (celle-ci serait nulle). En particulier un électron n'a pas de trajectoire au sens de la mécanique classique du terme : ainsi qu'on l'a vu plus haut, contrairement au modèle de Bohr, il n'est pas en orbite autour du noyau comme une planète autour du soleil : plus exactement, même si sa trajectoire décrit une orbite, celle-ci en peut être déterminée. Sa position est donc décrite par une probabilité de présence, que l'on représente par un nuage de points (ou par un halo) plus dense au voisinage de la position moyenne et de moins en moins dense au fur et à mesure que l'on s'éloigne de cette position : une telle description porte le nom d'orbitale. De façon plus précise, on définit l'orbitale comme la région de l'espace où la probabilité de trouver l'électron est de 95 %.

Le repos n'existe pas

Toujours à cause du principe d'incertitude, le repos n'existe pas, sinon on connaîtrait au même instant à la fois la position et la vitesse de la particule. Il en résulte qu'à chaque instant toutes les particules de l'univers sont en mouvement.

Le vide n'est pas vide

La valeur d'un champ et la vitesse d'évolution de cette valeur jouent des rôles identiques à la position et la vitesse d'une particule, on ne peut pas connaître précisément les deux en même temps. Il en résulte que le vide total n'existe pas. En effet, le vide total signifie que la valeur et la vitesse d'évolution d'un champ (gravitationnel, électromagnétique...) sont simultanément nuls (si la vitesse d'évolution n'était pas nulle, le vide ne resterait pas vide), ce qui est interdit par le principe d'incertitude. Donc l'espace n'est jamais vide : il peut être dans un état d'énergie minimale (que nous désignons par "le vide"), mais cet état est sujet à des fluctuations quantiques, ou fluctuations du vide, que l'on peut donc concevoir comme des apparitions et des disparitions incessantes de particules et de champs.

IV – La quantification

Après avoir parlé de mécanique quantique, il est maintenant temps de parler de quantification.

En mécanique, on appelle quantité de mouvement \mathbf{p} d'une particule le produit de sa masse m par sa vitesse \mathbf{v} : $\mathbf{p} = m \mathbf{v}$. On appelle action A le produit scalaire de la position \mathbf{r} de la particule par sa quantité de mouvement : $A = \mathbf{r} \cdot \mathbf{p}$. Notons au passage que, la position étant une vitesse multipliée par un temps $[v][t]$ et la quantité de mouvement une masse par une vitesse $[m][v]$, l'action est le produit $[v][t][m][v]$

soit $[m][v]^2[t]$; or une masse multipliée par le carré d'une vitesse est une énergie $[E]$ [rappelons-nous que l'énergie cinétique d'une particule vaut $1/2(mv^2)$], donc une action est aussi le produit d'une énergie par un temps : $[A] = [E][t]$ elle s'exprime en Joules \times secondes (ou Js). L'action est une mesure du changement qui intervient dans un système. Nous reviendrons à la fin de cette conférence sur la notion d'action. Pour l'instant il nous suffit de noter que, en mécanique classique, la position et la vitesse d'une particule varient de façon continue, d'où en particulier la notion de trajectoire représentée par une ligne continue.

Les scientifiques s'accordent pour faire remonter la naissance de la mécanique quantique à l'année 1899, avec l'énoncé par Max Planck du principe de quantification⁽³⁾ qui stipule que "dans la nature, des actions plus petites que \hbar ne peuvent pas être observées" (où \hbar est toujours la constante de Planck h divisée par 2π ; dans cet article⁽³⁾, h était désignée par b). Là se trouve le fondement de la quantification.

Ce principe signifie tout simplement que la trajectoire d'une particule quantique ne peut pas être une ligne continue ! On voit que ce principe contient en lui-même implicitement le principe d'incertitude de Heisenberg, mais est bien plus puissant que ce principe. En effet le principe de Heisenberg est relatif à la mesure : il exprime qu'on ne peut pas "mesurer" une trajectoire. Le principe de quantification de Planck affirme que la trajectoire elle-même n'existe pas en tant que ligne continue. En effet, lorsque le photon se déplace, sa position change, donc l'action associée change ; on montre que la quantité de mouvement du photon vaut $p = h/l$, où l est la longueur d'onde de la lumière. Il en résulte que, lorsque le photon se déplace de Δx , l'action varie de $(h/l)\Delta x$: le principe de quantification de Planck nous dit que : $(h/l)\Delta x \geq h/2\pi$, ce qui implique que $\Delta x \geq l/2\pi$. Ainsi le photon avance par "sauts de puce" et pas de façon continue. Si les "sauts de puce" sont inférieurs à cette quantité, alors il faut admettre soit que la longueur d'onde varie au cours de la trajectoire, c'est à dire que pendant son trajet la lumière change de couleur, soit que le principe de quantification de Planck est faux. Si l'on veut représenter une trajectoire, il faut donc l'imaginer non pas comme une courbe continue, mais comme une succession de points disjoints les uns des autres.

Est-ce à dire pour autant qu'il faille jeter à la poubelle les équations de la physique classique ? Certainement pas, et ce uniquement à cause de la petitesse de la constante de Planck. Rappelons en effet que celle-ci vaut :

$$h = 6,62 \times 10^{-34} = \frac{6,62}{10\ 000\ 000\ 000\ 000\ 000\ 000\ 000\ 000\ 000\ 000}$$

Ainsi à notre échelle, les variations possibles sont si infimes que le mouvement, bien que saccadé, nous semble être continu, de même que nous semble être continue une ligne constituée de pointillés très serrés. De même les fluctuations de position autour de la trajectoire sont infimes par rapport à l'épaisseur d'un trait. Les lois de la physique classique restent valables à notre échelle, elles ne le sont plus à l'échelle atomique ou même nanométrique.

Au stade où nous en sommes de cette conférence, nous commençons à apprécier combien sont déroutantes les lois de la mécanique quantique. Nous voyons aussi que des notions tout à fait basiques de trajectoire, de repos, de vide, de notion même de particule ou d'onde, ont des réalités physiques qui dépendent du modèle utilisé, celui de la mécanique classique ou celui de la mécanique quantique.

V – Hasard ou déterminisme ?

Reprenons à nouveau l'exemple de la lumière (2).

Chacun sait que la lumière peut être polarisée. La lumière, dans sa représentation d'onde électromagnétique, est dite polarisée rectilignement si le champ électrique oscille en conservant la même direction, dans le plan d'onde perpendiculaire à la direction de propagation (tout comme une corde qui vibre suivant une direction donnée perpendiculaire à la corde).

La polarisation d'une onde électromagnétique, telle la lumière, est un phénomène couramment rencontré. Ainsi les ondes électromagnétiques utilisées en télévision terrestre (analogique ou numérique) ou par satellite, sont polarisées, en général horizontalement (d'où les antennes « râteau » horizontales). De même, la lumière du ciel est partiellement polarisée : c'est pour cette raison que les photographes utilisent des filtres polariseurs afin d'assombrir plus ou moins le ciel sur les photographies, et augmenter ainsi le contraste ou la profondeur du bleu du ciel.

Supposons qu'un faisceau lumineux soit polarisé verticalement (voir figure 2) : ceci peut être aisément obtenu en interposant, sur le trajet d'un faisceau lumineux quelconque, un filtre polariseur P orienté verticalement : toute la lumière traversant P est alors polarisée verticalement. Imaginons que nous recevions ce faisceau polarisé mais que nous ignorions sa direction de polarisation : comment la déterminer ?

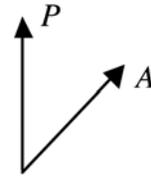


Figure 2

Il nous suffit, comme les photographes, d'interposer sur le trajet de ce faisceau polarisé, un autre filtre polariseur A (appelé analyseur), et de le faire tourner :

- lorsque la polarisation de l'analyseur A est verticale, il laisse passer toute la lumière, l'intensité lumineuse à la sortie est maximale. En termes de photons, cela signifie que l'analyseur laisse passer tous les photons ;
- lorsque la polarisation de l'analyseur A est horizontale, aucune lumière ne passe, il y a extinction totale, aucun photon ne traverse l'analyseur, tous les photons sont bloqués ;
- ayant ainsi repéré la direction (verticale) de polarisation du faisceau, orientons l'analyseur à 45° par rapport à cette verticale (figure 2). Dans ce cas la moitié de la lumière passe, l'intensité lumineuse à la sortie de l'analyseur est la moitié de celle du faisceau incident. Cela signifie que la moitié des photons traverse l'analyseur, l'autre moitié est bloquée. En d'autres termes, un photon a une chance sur deux d'être bloqué par l'analyseur, et une chance sur deux de le traverser. Que se passe-t-il si le faisceau incident est constitué d'un seul photon ? Il a 50 % de chances de traverser l'analyseur, et 50 % de chances d'être bloqué : si l'on fait l'expérience avec un photon, il se peut qu'il passe, et si l'on répète la même expérience dans les mêmes conditions avec un second photon, il se peut qu'il soit bloqué, donc que le résultat de la seconde expérience soit différent de celui de la première expérience. De plus, si le photon traverse l'analyseur, il est polarisé suivant la direction de l'analyseur, c'est à dire que sa polarisation a changé.

Nous avons ainsi obtenu trois résultats fondamentaux qui ont été généralisés et constituent des postulats de la mécanique quantique, encore jamais mis en défaut en dépit de milliers d'expériences réalisées depuis.

1) Lorsqu'on effectue une mesure sur un système quantique, en général on ne connaît pas le résultat final, on peut trouver une valeur parmi un grand nombre de valeurs possibles, chacune avec une certaine probabilité. Cette probabilité est une caractéristique intrinsèque de la mesure, elle n'a rien à voir avec une quelconque incertitude ou imprécision liée à l'appareil de mesure.

2) Le résultat de la mesure modifie l'état du système, sauf cas tout à fait particuliers : ainsi le photon qui serait polarisé suivant P verrait sa polarisation inchangée au sortir de P .

3) La valeur moyenne des différents résultats possibles portant sur un grand nombre de systèmes quantiques (ici un faisceau lumineux constitué d'un grand nombre de photons) redonne le résultat de la mesure classique : c'est d'ailleurs en partie la démonstration expérimentale de cette transition entre la physique quantique et la physique classique qui a valu à Serge Haroche le prix Nobel de physique 2012.

Ces postulats, énoncés au début du XX^e siècle, ont ébranlé les convictions des physiciens de l'époque. En effet, ils remettent en cause ce qui fait le fondement même de la science : la reproductibilité de la mesure, à tel point que Einstein lui-même, pourtant l'un des fondateurs de la mécanique quantique, n'admettait pas cette incertitude fondamentale et s'opposait à l'école de Copenhague, déclarant « Dieu ne joue pas aux dés », ce à quoi Heisenberg lui aurait répondu « qui êtes-vous, monsieur Einstein, pour dire à Dieu ce qu'il doit faire ? ».

De plus, puisqu'une mesure sur un système change son état, on ne *peut pas* cloner l'état quantique inconnu d'un système. Le théorème de non clonage est à la base des techniques de cryptographie quantique, qui se développent aujourd'hui considérablement tant à cause des enjeux militaires (secret des transmissions) que civils (sûreté des transferts bancaires, etc.).

Nous voici donc une nouvelle fois en présence de deux réalités différentes :

- à l'échelle humaine (nous dirons « macroscopique »), les résultats scientifiques sont reproductibles (c'est d'ailleurs la raison pour laquelle on peut les qualifier de scientifiques !) ;
- à l'échelle atomique, les résultats sont intrinsèquement non reproductibles : c'est une nouvelle vérité qu'il nous faut accepter.

Ainsi le monde n'est pas déterministe, au moins à l'échelle atomique, c'est à dire à son niveau fondamental : il se construit à partir du hasard. Non pas même le hasard des dés selon la boutade d'Einstein : lorsqu'on jette les dés, on peut imaginer que, si l'on connaissait tous les paramètres du lancer de dés, on pourrait prédire le résultat. Ici il s'agit d'un hasard beaucoup plus fondamental, un hasard intrinsèque, inhérent au processus même qui engendre un résultat totalement imprévisible. Notons d'ailleurs que ce hasard totalement inattendu est peut-être ce qui nous rend libre, puisque dans un monde parfaitement déterministe nous serions totalement privés de liberté.

VI – Un système dans un état délocalisé

Comment décrire l'état d'un système ?

En mécanique classique

Un système mécanique classique s'inscrit clairement dans un repère pré-existant, l'espace à trois dimensions que nous connaissons : dans un tel repère, qui est le même pour tous, on peut disposer des objets et les mettre en mouvement en leur appliquant des forces. Ainsi l'état d'une particule est défini par sa position (un point de coordonnées x, y, z) affectée d'un vecteur vitesse \mathbf{v} (ou d'un vecteur quantité de mouvement $\mathbf{p} = m\mathbf{v}$). En fait on préfère représenter cette particule non pas par un point de coordonnées x, y et z , et le vecteur vitesse associé de composantes v_x, v_y et v_z , mais seulement par un point de coordonnées (x, y, z, v_x, v_y, v_z) , dans un espace fictif, l'espace des phases à six coordonnées incluant donc trois coordonnées de position et trois coordonnées de vitesse. A un instant donné, la particule est représentée par un point dans l'espace des phases, point qui se déplace au fur et à mesure que le temps s'écoule, décrivant le mouvement de la particule.

Pour donner une idée d'un tel espace et de son intérêt, prenons l'exemple simple d'un jeu vidéo simulant l'alunissage en douceur d'un module d'exploration lunaire (*Lunar Exploration Module*, LEM) qui se rapproche de la lune suivant une trajectoire verticale par rapport à la lune. Le joueur active plus ou moins la rétrofusée pour ralentir la chute et se poser en douceur. La trajectoire est alors verticale, donc unidimensionnelle. Si l'on ne voit sur un écran que la hauteur de l'engin par rapport au sol et sa vitesse verticale repérée par un vecteur, cette opération est longue et difficile. Si au contraire l'écran montre un diagramme avec en abscisse la vitesse du LEM et en ordonnée sa hauteur par rapport au sol, l'état du LEM est à tout instant repéré par un point sur ce diagramme, et le jeu consiste à amener ce point à l'origine des coordonnées, le problème devient si simple qu'il peut être automatisé. Ce diagramme est l'espace des phases pour la particule unidimensionnelle.

L'état d'une particule se déplaçant dans un espace à trois dimensions est donc décrit par un point dans un espace des phases à six dimensions. Si nous avons affaire à un système de deux particules, chacune sera repérée dans un espace des phases à six dimensions, mais l'on préférera utiliser un espace à douze dimensions où le système sera repéré non pas par deux points, mais par un seul point qui décrira le système (on dit que l'espace est le produit tensoriel des espaces des deux particules). Plus généralement un système constitué de N particules sera décrit par un point dans un espace à $6N$ dimensions.

On voit que l'espace des états, en mécanique classique (appelé alors espace des phases), d'une part est propre au système étudié, d'autre part n'existe pas réellement, puisqu'il peut avoir un nombre considérable de dimensions, mais néanmoins il est d'une certaine manière "ancré" dans l'espace "réel" à trois dimensions dans lequel nous vivons puisqu'il comporte les coordonnées d'espace du système ou des particules qui le composent. Par ailleurs, la connaissance de l'état du système permet d'obtenir la valeur de toutes les observations que l'on peut faire sur cette particule : position, vitesse, énergie cinétique, énergie potentielle, énergie totale, etc.

En mécanique quantique

Tout comme en mécanique classique, l'état du système quantique doit décrire tous les aspects du système, dans le but de prévoir les résultats des expériences que l'on peut réaliser. Cependant, contrairement à la mécanique classique, il est maintenant impossible de déterminer de manière absolue les résultats de mesures des grandeurs physiques, puisque nous avons vu par exemple qu'il n'était pas possible de déterminer exactement la position et la vitesse d'une particule, mais qu'on pouvait seulement avoir accès à la probabilité de trouver tel ou tel résultat, chaque mesure étant elle-même entachée d'une incertitude de nature fondamentale (indépendamment de la précision de l'appareil de mesure). Il faut donc en mécanique quantique dissocier l'espace des états, qui décrit le système, des observations qu'il est possible de faire sur ce système.

On postule donc que l'ensemble des états accessibles à un système quantique fait partie d'un espace vectoriel, l'espace des états, qui est attaché au système, et qui n'a rien à voir avec l'espace tridimensionnel dans lequel nous évoluons. Il est très important d'insister sur le fait que, alors qu'un système classique est plongé dans un espace préexistant (même si, comme nous l'avons remarqué, l'espace des phases est une construction mathématique et peut en particulier avoir un grand nombre de dimensions), l'espace des états d'un système quantique ou d'une particule est attaché au système et n'a rien à voir avec l'espace dans lequel nous vivons. Cet espace des états est parfaitement "délocalisé", il n'est "nulle part", c'est une construction mathématique. Un état donné du système est donc représenté par un vecteur appartenant à l'espace vectoriel de tous ses états possibles.

Ce n'est cependant pas seulement une construction mathématique. C'est aussi une réalité physique. Ainsi par exemple, l'ensemble des états vibratoires d'un violon, est constitué par l'ensemble des sons que peut faire entendre ce violon, que l'on peut considérer comme une combinaison des sons que peuvent émettre ses différentes cordes : c'est l'espace vectoriel des états du violon, que l'on ne voit pas, mais que l'on entend, et qui caractérise le violon en question. Cet ensemble d'états vibratoires porte même un nom, c'est le timbre de l'instrument. Ce timbre est associé à l'instrument lui-même, le timbre d'un violon est différent de celui d'un piano, il est même différent de celui d'un autre violon. De plus, il est indépendant de la localisation géographique de l'instrument, il est le même à Paris et à New York, il n'est donc pas lié à l'espace tridimensionnel dans lequel nous évoluons.

De la même manière, l'espace des états d'un système quantique est lié au système lui-même et n'a rien à voir avec la localisation spatio-temporelle de ce système, il est délocalisé.

VII – Etats intriqués et conséquences

Etats intriqués et "transmission de pensée"

L'intrication est une propriété spécifique aux systèmes quantiques, elle n'a pas d'analogue classique. Deux particules sont dans un état intriqué si l'état du système constitué par ces deux particules est tel qu'une action quelconque sur une particule se traduit par une modification de l'état de l'autre particule.

L'image que l'on peut se faire d'un tel système est celle d'un haltère, constitué de deux disques reliés par une barre, à ceci près que dans un système quantique la liaison n'est pas matérielle. Toute rotation imprimée à un disque entraîne *instantanément* une rotation de l'autre disque.

Considérons deux particules (1) et (2) (par exemple deux photons) comportant deux états de base (par exemple les polarisations verticale et horizontale). Ces photons sont polarisés, mais nous ne savons pas dans quelle direction. Si nous mesurons cette polarisation sur le photon (1) avec un filtre polariseur, nous pouvons trouver soit le résultat *V* (polarisation verticale) avec une certaine probabilité qui dépend de la direction de polarisation initiale du photon, soit le résultat *H* (polarisation horizontale) avec la probabilité complémentaire. Si les deux photons sont indépendants, le résultat trouvé sur un photon ne dépend pas du résultat trouvé sur l'autre. Imaginons qu'il soit possible de construire le système de deux particules (1) et (2) dans un état intriqué, c'est à dire de lier les deux photons, de telle sorte par exemple que si la mesure de polarisation de l'un donne le résultat *V*, la polarisation de l'autre soit *H* et vice versa. Supposons de plus qu'il soit possible de séparer physiquement les deux particules (1) et (2) en conservant le système dans cet état. Un opérateur dénommé Alice va effectuer une mesure sur la particule (1), et un autre opérateur dénommé Bob va, à une grande distance d'Alice, effectuer une mesure sur la particule (2). Avant d'effectuer la mesure, Alice et Bob savent que la particule sur laquelle portera leur mesure est dans un état intriqué, mais ni l'un ni l'autre ne savent quel sera le résultat de la mesure qu'ils vont effectuer, ils savent que chacun a par exemple 50 % de chances de trouver le résultat *V* et 50 % de chances de trouver le résultat *H*. Supposons qu'Alice effectue la mesure et trouve le résultat *H*, alors la particule de Bob se mettra *instantanément* dans l'état *V*, de sorte que si Bob effectue sa mesure il trouvera le résultat *V*, même si la mesure de Bob est effectuée immédiatement après la mesure d'Alice, c'est à dire après un laps de temps inférieur au temps de parcours de la lumière entre les sites d'Alice et Bob : ceci signifie que l'intrication entre les deux particules est non locale, ceci est dû au fait mentionné plus haut que l'espace des états du système des deux particules est délocalisé.

On peut comparer ce problème à celui de deux voyageurs : un système est constitué d'une boule rouge et d'une boule blanche. Une boule est placée dans la valise d'Alice qui part en voyage pour une destination A, l'autre dans la valise de Bob qui part pour la destination B. Ni Alice ni Bob ne connaissent la couleur de la boule qu'ils emportent, ils savent seulement qu'une boule est blanche, l'autre est rouge. Arrivés à destination, Alice ouvre sa valise : avant de l'ouvrir, elle sait qu'elle a 50 % de chances de trouver une boule rouge, 50 % de chances de trouver une blanche. Mais si elle y trouve une boule blanche, elle sait que Bob a une boule rouge et vice versa.

En réalité le problème quantique est très différent : dans le problème des voyageurs, dès le départ chaque boule est identifiée : celui qui a construit le système (= mis les boules dans les valises) sait quelle boule trouvera Alice et quelle boule trouvera Bob. Dans le cas d'une paire de boules quantiques intriquées au contraire, chaque particule n'est pas dans un état bien défini, mais dans un mélange d'états. En d'autres termes, pendant le voyage d'Alice et Bob, chacune des deux boules n'est ni rouge, ni blanche, toutes deux sont « roses » : c'est l'ouverture de la valise par Alice qui force la boule d'Alice à prendre la couleur blanche, et cette action force *instantanément* la boule de Bob à prendre la couleur rouge. Mais si Alice répète son

expérience, c'est à dire ouvre une nouvelle fois la valise, cette observation forcera peut-être sa boule à prendre la couleur rouge, alors la boule de Bob prendra *instantanément* la couleur blanche. Tout se passe comme si la « pensée » d'Alice s'était transmise à Bob qui réagit en conséquence. Le point important est que cette transmission s'effectue de façon *instantanée*, donc à une vitesse supérieure à celle de la lumière, et ceci quelle que soit la distance qui sépare Alice de Bob.

Article d'Einstein Podolsky et Rosen (EPR) et variables cachées

Bien qu'il fut l'un des initiateurs de la mécanique quantique, dès les années 1920 Einstein s'est opposé à Niels Bohr (4) sur l'interprétation à donner à la théorie quantique. Ce débat a duré jusqu'à la fin de leurs vies, se concentrant à partir de 1935 sur la question soulevée par un fameux article d'Einstein, Podolsky et Rosen (5) sur les propriétés surprenantes des états intriqués (appelés aussi pour cette raison états EPR). Einstein n'admettait pas que des mesures effectuées sur une particule puissent se répercuter *instantanément* sur une autre particule distante de la première, donc à une vitesse supérieure à celle de la lumière. Il est remarquable que, face à ces contradictions apparentes, Einstein n'ait pas contesté le bien fondé du formalisme quantique : il a conclu au contraire que ce formalisme était incomplet, et devait comporter des "variables cachées".

Que sont ces "variables cachées" ? Comme on peut le lire dans "*Einstein aujourd'hui*" (6), les biologistes, observant que les vrais jumeaux possèdent des caractères identiques (couleur des cheveux, couleur des yeux, groupe sanguin, type d'histocompatibilité, etc.), ont conclu que ces caractéristiques sont déterminées par des chromosomes (qui sont les "variables cachées"), identiques pour les deux jumeaux d'une même paire, et cela bien avant qu'on ait effectivement observé les chromosomes au microscope électronique.

Aux arguments EPR, Niels Bohr répondit que, dans un état quantique intriqué, "non factorisable", on ne peut parler des propriétés individuelles de chaque électron, et cela même s'ils sont très éloignés l'un de l'autre (7). Il fallut pour résoudre le problème posé par l'article EPR attendre l'article (8) de John Bell (1964) et les expériences d'Alain Aspect (9, 10), puis celles de téléportation quantique (7, 11, 12). Notons au passage que la téléportation quantique n'a pas grand chose à voir avec la téléportation telle qu'on la représente dans les films de science-fiction : dans ces créations artistiques en effet, la téléportation se présente comme un transfert de matière réalisé de façon immatérielle entre un lieu et un autre. En mécanique quantique au contraire, la téléportation concerne seulement de l'information, en aucun cas de la matière : une image simple de la téléportation quantique est donnée par Nicola Gisin, de l'Université de Genève, de la façon suivante. Soit à téléporter une statue de plâtre du point A au point B :

- dans un film de science-fiction : la statue est disposée en A, et au point B il n'y a rien. Puis la statue se déconstruit en A en même temps qu'elle apparaît en B. Au final il y a donc eu transport immatériel de la statue de A en B.
- en mécanique quantique : la statue est disposée en A, il faut en plus mettre un sac de plâtre en B et "intriquer" (c'est à dire coupler) la statue et le sac de plâtre. Au cours de la téléportation, la statue en A se "déconstruit" pour devenir sac de plâtre, le sac de plâtre en B se construit en statue identique à celle qui était en A. Au final, on a un sac de plâtre en A et la statue en B : il n'y a pas transport de plâtre entre A et B, il faut que préexiste en B le matériau permettant la téléportation.

La non localité quantique correspond à une négation en bloc de la vision réaliste locale du monde : les photons intriqués ne sont pas deux systèmes distincts portant deux copies identiques d'un même ensemble de paramètres (tels deux frères jumeaux) : une paire de photons intriqués doit être considérée comme un système unique, inséparable, décrit par un état quantique global, impossible à décomposer en deux états relatifs à chacun des deux photons : les propriétés de la paire ne se résument pas à la réunion des propriétés des deux photons.

Ces propriétés tout à fait surprenantes des états intriqués ont depuis les années 1990 été confirmées, par des expériences réalisées sur des particules ou sur des photons distants de plus de 200 km ! Elles résultent du fait que l'état d'un système quantique est délocalisé et n'a aucun lien avec l'espace tridimensionnel dans lequel nous vivons. Chose plus extraordinaire encore, en 2012, des parties de cristaux à base d'ytterbium et de néodyme, de dimension visible à l'œil nu, gros comme des morceaux de sucre, ont pu être intriqués par l'équipe suisse de Nicolas Gisin ; plus exactement, un milliard d'atomes d'un cristal a pu être intriqué avec un milliard d'atomes de l'autre cristal. C'est considérable, mais on est encore loin de pouvoir intriquer des morceaux entiers : à titre d'exemple, un gramme de fer contient 10 000 milliards de fois plus d'atomes que ceux intriqués par l'équipe suisse. Ces expériences ouvrent des perspectives considérables :

- elles nous montrent que non seulement la réalité est différente de ce que nous observons ou de ce que nous mesurons, ce que nous savions déjà, mais encore qu'elle est dans certains cas fondamentalement inaccessible : l'observation portant sur une des deux particules d'un système intriqué détruit l'état du système (on dit qu'il y a décohérence) et donc ne nous permet pas d'appréhender l'état de ce système ;
- elles démontrent que nous sommes confrontés à une nouvelle réalité jusqu'alors inconcevable : différents éléments d'un système peuvent ne pas être indépendants même s'ils sont très éloignés l'un de l'autre ;
- elles ouvrent la voie à des expériences fabuleuses telles la téléportation, la cryptographie quantique, les ordinateurs quantiques.

VII – Le don d'ubiquité du photon

Etre au même instant à plusieurs endroits différents : voici encore un beau thème de science-fiction. Hé bien, nos particules-ondes possèdent cette surprenante propriété !

Reprenons l'expérience d'interférences de la figure 1, mais au lieu d'envoyer à partir de la source S un faisceau lumineux constitué de milliards de photons, envoyons les photons un par un. On constate le résultat suivant :

- si seul le trou S_1 est ouvert, les photons vont impacter l'écran au point d'intersection de celui-ci avec la droite $S S_1$;
- si seul le trou S_2 est ouvert, les photons vont impacter l'écran au point d'intersection de celui-ci avec la droite $S S_2$;
- si maintenant les deux trous S_1 et S_2 sont ouverts, les photons vont s'accumuler dans les régions d'interférence constructive, aucun photon ne va impacter l'écran en un endroit de frange sombre.

Cette expérience a été réalisée en utilisant non pas les trous schématisés figure 1, mais avec un système un peu plus sophistiqué, un interféromètre de Mach-Zender. Elle a même pu être réalisée en 1999 par un groupe de chercheurs autrichiens avec des molécules de fullerène. Le fullerène C60 est une molécule qui a la même structure qu'un ballon de football, la forme sphérique étant réalisée par des assemblages cycliques d'hexagones de 6 atomes et de pentagones de 5 atomes, et dont le diamètre est de l'ordre du nanomètre : comme avec les photons, une molécule de fullerène n'atteindra jamais l'écran en un point d'interférence destructive.

Comment interpréter le fait qu'une particule quantique "sait" où elle doit aller et où ne pas aller ? Justement par le fait que sa trajectoire n'est pas définie, ce qui ne signifie pas qu'il n'y ait pas de trajectoire. Au contraire, d'après Feynmann (1918-1988, prix Nobel de physique 1965), la particule explore *toutes* les trajectoires possibles, et elle le fait de façon *simultanée* : les trajectoires passent par une fente, par l'autre, reviennent par la première, font le tour du soleil, voire visitent l'Univers entier, etc., bref une infinité de trajectoires : c'est le seul moyen qu'a la particule de savoir s'il y a une fente, deux fentes ou plus. Lorsqu'il y a deux fentes, les trajectoires passant par la première peuvent interagir avec celles passant pas la seconde, créant ainsi des interférences. En d'autres termes la particule est partout à la fois ! Voici qui ressemble à s'y méprendre à de la science-fiction, et pourtant ce n'en est pas !

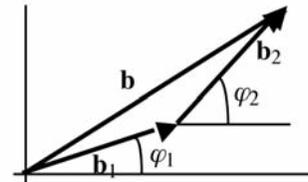
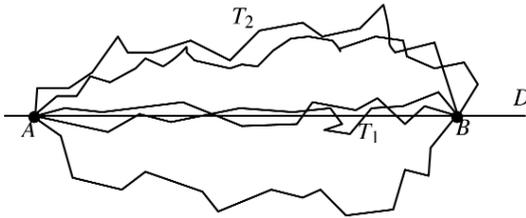


Figure 3 : Exemples de trajectoires entre A et B Figure 4 : Addition des phases

En partant de cette idée, Feynmann a élaboré une formulation mathématique différente de la théorie "classique" de la mécanique quantique, qui en retrouve cependant les résultats. Supposons (figure 3) qu'une particule classique quitte un point A et soit libre, soumise à aucune force : elle suit une trajectoire rectiligne, n'a aucune possibilité de la quitter, et au bout d'un certain temps atteint un point B. De quelle manière une particule quantique va du point A au point B ? Elle explore toutes les trajectoires possibles, il y en a une infinité (figure 3). A une trajectoire donnée, par exemple T_1 , Feynmann associe une phase, disons la position sur une période de l'onde : elle permet de déterminer si on se trouve au sommet de l'onde, en un creux ou en un point intermédiaire. Cette phase est un angle φ_1 , représenté par un vecteur de longueur unité \mathbf{b}_1 (figure 4). De même pour la trajectoire T_2 , à laquelle correspond la phase φ_2 donc le vecteur \mathbf{b}_2 qu'on ajoute à \mathbf{b}_1 comme indiqué figure 4, ce qui donne le vecteur \mathbf{b} . On ajoute ainsi toutes les phases correspondant à toutes les trajectoires possibles allant de A à B (il y en a une infinité !) : on obtient l'"amplitude de probabilité" que la particule partant de A atteigne B ; le carré de cette amplitude de probabilité donne la probabilité exacte de trouver la particule en B.

Pour les trajectoires telles que T_1 voisines de la droite AB , les phases sont presque égales, les vecteurs représentatifs sont presque alignés, la longueur totale relative à ces trajectoires est importante (figure 5). Au contraire, pour les trajectoires éloignées de la droite AB , à cause de l'extrême petitesse de la constante de Planck, des trajectoires très voisines correspondent à des phases très différentes et la somme des vecteurs correspondants est très petite (figure 6).

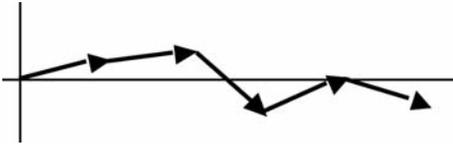


Figure 5 : Exemple de 5 trajectoires voisines de la droite AB .



Figure 6 : Exemple de 5 trajectoires éloignées de la droite AB .

La théorie de Feynmann nous fournit ainsi une image particulièrement claire de la façon dont la mécanique newtonienne peut émerger d'une physique quantique pourtant très différente, car il s'avère que, pour des objets de "grande" taille, les chemins très voisins des trajectoires newtoniennes ont des phases très proches : ces phases se renforcent donc, elles contribuent très majoritairement à la somme et concentrent les probabilités significativement non nulles autour de cette trajectoire. Ainsi les objets macroscopiques se déplacent comme le prédit la mécanique classique.

IX – Conclusion : la réalité modèle-dépendant

Les considérations développées ci-dessus me permettent de reprendre presque mot pour mot la conclusion d'un précédent article (2)

Fallait-il attendre la mécanique quantique, la seconde moitié du XX^e siècle et la formulation de Feynman pour imaginer qu'un photon par exemple (ou toute autre particule, « quantique » ou non d'ailleurs) était délocalisé dans l'espace et pouvait explorer simultanément toutes les trajectoires possibles pour choisir celle qui lui convenait (c'est à dire celle qui correspond à un maximum de probabilité) ? Curieusement non !

C'est en 1687 qu'Isaac Newton, formalisant les idées de Galilée (1564-1642) et en tirant toutes les conséquences, a énoncé les deux principes fondamentaux de la mécanique classique dans le premier volume de son *Philosophiae Naturalis Principia Mathematica*.

Mais trente ans plus tôt, en 1657 Pierre de Fermat, (1601-1665) avait énoncé un principe, publié en 1662 dans son mémoire « *Synthèse pour les réfractions* », selon lequel « La lumière se propage d'un point à un autre sur des trajectoires telles que la durée du parcours soit localement minimale », se fondant sur un principe moral : « La nature agit toujours par les voies les plus courtes et les plus simples ». En 1740, Pierre Louis Moreau de Maupertuis (1698-1759) en complète la conception en énonçant le principe qui porte son nom et qui, une fois peaufiné par Euler puis en 1788 par Joseph Louis Lagrange (1736-1813), devient le *principe de moindre action*, encore en vigueur aujourd'hui. La plupart des équations fondamentales de la physique peuvent être formulées à partir de ce principe. C'est notamment le cas en mécanique classique (Hamilton 1827 puis Jacobi 1840), en relativité générale

(Hilbert 1916) et en théorie quantique des champs (1942 : Feynman utilise ce principe pour retrouver l'équation de Schrödinger, son intégrale de chemin est une généralisation de ce principe).

Le principe de moindre action stipule que, pour aller d'un point A à un point B , une particule emprunte le trajet tel que l'intégrale sur la durée du trajet de la quantité $T - U$, où T est l'énergie cinétique et U l'énergie potentielle, est extrémale (minimale ou maximale). Puisque la loi fondamentale de la dynamique peut se démontrer à partir du principe de moindre action, celui-ci a été considéré au début seulement comme une formulation mathématique, équivalente à celle de la mécanique classique. Néanmoins la signification physique qu'il sous-tend est très forte, elle a donné lieu à des interprétations telle que « la particule teste tous les chemins possibles avec des probabilités différentes » (13). En effet, c'est comme si un conducteur de voiture, pour aller d'un point A à un point B , utilisait le chemin lui permettant de consommer le moins de carburant possible : comment pourrait-il le faire sans explorer auparavant tous les chemins possibles ?

Aujourd'hui nous nous faisons de la mécanique classique, grâce à Newton, l'image d'objets tirés par des forces et dont les déplacements successifs construisent la trajectoire. Mais imaginons un instant que Newton n'ait pas existé, que les lois de la mécanique newtonienne n'aient pas été découvertes, et que la formulation et l'étude de la mécanique aient commencé avec l'énoncé du principe de moindre action. Les scientifiques de l'époque auraient alors *nécessairement* été conduits à imaginer que, pour savoir quelle trajectoire emprunter pour aller de A vers B , la particule *classique* était obligée d'explorer de façon instantanée et en même temps, l'infinité de toutes les trajectoires possibles, seule manière pour elle de choisir celle qui convenait, satisfaisant au principe de moindre action ! La réalité classique aurait donc été pour nous le modèle quantique de Feynman. Un jour peut-être, un autre formalisme quantique, une autre réalité, remplacera celle résultant du modèle de Feynman.

La mécanique classique nous avait permis de découvrir et de calculer des trajectoires, la mécanique quantique nous apprend que la trajectoire n'existe pas, qu'on peut seulement connaître la probabilité de trouver une particule à un endroit, et qu'en même temps chaque particule explore toutes les trajectoires possibles pour aller d'un point A à un point B afin de choisir celle qu'elle emprunte effectivement ! Et d'ailleurs on ne sait même plus ce qu'est une particule, puisque cela peut aussi bien être une onde.

A la fin du XIX^e siècle, une réalité s'était imposée : l'existence de l'éther, sorte de fluide interplanétaire nécessaire à la propagation des ondes lumineuses. Puis les modèles de propagation des ondes électromagnétiques ont démontré l'inutilité de ce fluide, une nouvelle réalité s'est imposée : l'existence du vide intersidéral, dont la théorie quantique des champs a ensuite démontré qu'il n'existait pas et qu'il fluctuait.

De même s'était imposée à nous, via le modèle newtonien, la réalité de la masse d'un corps, quantité intrinsèque accessible à la mesure. Aujourd'hui, avec la découverte du boson de Higgs, va s'imposer une autre réalité : le fait que la masse n'est pas une propriété intrinsèque de la matière, mais résulte de l'interaction de la matière avec un fluide constitué de bosons, c'est à dire de particules associées à des ondes qui remplissent le vide interstellaire, en quelque sorte une nouvelle conception de l'éther, non plus support des ondes qui nous entourent, mais constitué par ces ondes (ou ces particules) elles-mêmes ! D'ailleurs, comment s'étonner d'être

immergés dans un champ de bosons de Higgs, puisque sans nous en rendre compte nous sommes déjà plongés dans le champ gravitationnel de tous les corps qui nous entourent, ainsi que dans les champs de photons (qui sont des bosons), constitué par toutes les ondes électromagnétiques issues des sources d'émission lumineuses, radio, télévision, téléphone, etc. ?

Ainsi, contrairement à ce que l'on pourrait croire, les progrès de la science, même moderne, ne tendent pas de façon régulière vers une approche de plus en plus précise d'une réalité intrinsèque, que nous pouvons espérer un jour appréhender et comprendre. La réalité nous apparaît aujourd'hui seulement comme étant l'image que nous nous faisons du monde qui nous entoure, image liée au *modèle* que nous utilisons pour interpréter nos observations et nos expériences : c'est une réalité-modèle-dépendant, par opposition à la réalité-vérité que probablement nous n'atteindrons jamais.

On peut dire, pour résumer, que la réalité n'existe pas en soi, qu'elle n'a pas d'existence en dehors de la représentation que nous nous en faisons.

RÉFÉRENCES

- (1) J.P. Nougier, "Science fiction et mécanique quantique (les lois étranges de la mécanique quantique)", Académie des Sciences et Lettres de Montpellier, séance du 15 octobre 2012, p. 275
- (2) J.P. Nougier, "Evolution de la pensée scientifique : de la réalité-vérité à la réalité-modèle-dépendant",
- (3) M. Planck, *Über irreversible Strahlungsvorgänge*, Sitzungsberichte der Preußischen Akademie der Wissenschaften, Berlin pp. 440–480, 1899.
- (4) N. Bohr, "Can Quantum Mechanical description of physical reality be considered complete ?", *Phys. Rev.*, **48**, 696 (1935).
- (5) A. Einstein, B. Podolsky, N. Rosen, "Can Quantum Mechanical description of physical reality be considered complete ?", *Phys. Rev.*, **47**, 777 (1935).
- (6) A. Aspect et al., "Einstein aujourd'hui", CNRS éditions, EDP Sciences, 2003.
- (7) M. Riebe *et al.*, "Deterministic quantum teleportation with atoms", *Nature* **429**, 734-737 (2004).
- (8) J.S. Bell, "On the Einstein-Podolsky-Rosen Paradox", *Physics* 1, 195-200 (1964). Article reproduit dans *Speakable and unspeakable in quantum mechanics*, J.S. Bell, Cambridge University Press, 2ème édition (2004)
- (9) A. Aspect, P. Grangier, and G. Roger, *Phys. Rev. Lett.*, Vol. 49, Iss. 2, pp. 91–94 (1982)
- (10) A. Aspect, J. Dalibard and G. Roger, *Phys. Rev. Lett.*, Vol. 49, Iss. 25, pp. 1804–1807 (1982)
- (11) C.H. Bennett *et al.*, "Teleporting an unknown quantum state via dual classical and einstein-Podolsky-Rosen channels", *Phys. Rev. Lett.* **70**, 1895-1899 (1993)
- (12) M.D. Barrett *et al.*, "Deterministic quantum teleportation of atomic qubits", *Nature* **429**, 737-739 (2004)
- (13) F. MARTIN-ROBINE, *Histoire du principe de moindre action*, éd. Vuibert (2006), p 209.