

Séance du 15 octobre 2012

Science-fiction et mécanique quantique (les lois étranges de la mécanique quantique)

par Jean-Pierre NOUGIER

MOTS-CLÉS

Science-fiction - Mécanique quantique - Dédoublément de personnalité - Passe-muraille - Effet tunnel - Vitesse supraluminique - Télépathie - Téléportation.

RÉSUMÉ

Le mouvement des particules, à l'échelle atomique, est décrit par la mécanique quantique, dont les lois, très différentes de celles de la mécanique classique, heurtent le sens commun et par suite sont difficilement compréhensibles. Dans la présente communication, ces lois sont expliquées de façon simple, par analogie avec un certain nombre de thématiques rencontrées en science-fiction : dédoublément de personnalité, passe-muraille et effet tunnel, voyage dans le temps, vitesse supraluminique, télépathie, téléportation. Bien que la réalité ne rejoigne pas la fiction, chacune de ces différentes thématiques se retrouve en mécanique quantique.

I – Introduction

La mécanique est une branche de la physique ayant pour objet l'étude des corps en mouvement ou à l'équilibre. A l'échelle humaine et jusqu'aux échelles astronomiques, les lois qui régissent le mouvement des corps sont celles de la mécanique classique, elles s'appliquent aux objets qui nous entourent, et nous sont donc familières. A l'échelle atomique, les lois qui régissent le mouvement des particules sont totalement différentes, elles ont été découvertes au début du XX^e siècle, et constituent la mécanique quantique. On s'accorde à faire remonter la naissance de la mécanique quantique à l'année 1899, où Max Planck (1) a énoncé un principe selon lequel "dans la nature, des actions plus petites que \hbar ne peuvent pas être observées" (h est la constante de Planck, $h = 6,62 \times 10^{-34}$ Js et $\hbar = h/2\pi$). Ainsi contrairement à la mécanique classique où les trajectoires des corps évoluent de façon continue, le mouvement des particules au niveau atomique se fait par sauts, par quanta (d'où le

nom de “mécanique quantique”) multiples de \hbar . En 1925, Erwin Schrödinger publiait l'équation qui porte son nom, et qui est aussi fondamentale en mécanique quantique que les lois de Newton en mécanique classique. Ainsi les lois de la mécanique quantique sont-elles totalement différentes de celles de la mécanique classique. Il s'ensuit qu'elles heurtent le sens commun et sont donc difficilement compréhensibles. Cette branche de la science est par ailleurs en plein essor aujourd'hui, comme en témoignent les récentes attributions de prix Nobel, par exemple pour la France Serge Haroche en 2012 et Claude Cohen-Tannoudji en 1997. Afin d'expliquer ces lois de façon simple et compréhensible, un parallèle est fait dans la présente communication avec un certain nombre de thèmes de science-fiction. En effet, bien que la réalité ne rejoigne pas la fiction, chacune des thématiques choisies se retrouve ou trouve une analogie en mécanique quantique.

Le terme français “*science-fiction*” (avec trait d'union) a pour origine le terme anglais “*science fiction*” (sans trait d'union) qui, selon l'encyclopédie en ligne Wikipedia, est apparu pour la première fois en 1853 et de manière isolée sous la plume de William Wilson dans un essai intitulé *A Little Earnest Book Upon A Great Old Subject*. En janvier 1927, on trouve dans les colonnes du courrier de la revue *Amazing Stories* la phrase suivante : “*Remember that Jules Verne was a sort of Shakespeare in science fiction.*” Mais ce n'est qu'à partir de 1929 que le terme commence à s'imposer aux États-Unis. Dans le monde francophone, le terme de science-fiction s'impose seulement à partir des années 1950 avec pour synonyme et concurrent direct le mot anticipation. Précédemment, on parlait plutôt de “merveilleux scientifique” ou de voyages “extraordinaires”.

On décrit d'ordinaire dans les dictionnaires la science-fiction comme un genre narratif qui met en scène des univers où se déroulent des faits impossibles ou non avérés en l'état actuel de la civilisation, des techniques ou de la science, et qui correspondent généralement à des découvertes scientifiques et techniques à venir. Les ouvrages de science-fiction sont légion, on en comptait plus de 400 vers l'an 2000, sur des thématiques variées incluant la biologie, la robotique, l'intelligence artificielle et les sciences cognitives, etc. Dans l'immense majorité des cas, ces ouvrages n'ont de science que le nom, mais à défaut d'aider à la compréhension des domaines évoqués, ils ont le don de frapper l'imagination, de sorte que l'on peut se prendre à rêver que la science sur certains points puisse un jour rejoindre la fiction.

Afin d'expliquer de façon simple quelques lois déroutantes de la mécanique quantique, j'ai choisi ici d'y associer quelques exemples de science-fiction pris dans des thématiques en relation avec la mécanique quantique : dédoublement de personnalité, effet tunnel, voyage dans le temps, vitesse supraluminique, télépathie, téléportation.

II – Dédoublement de personnalité

Le cas certainement le plus connu est “*L'Étrange Cas du docteur Jekyll et de M. Hyde*” (en anglais : “*Strange Case of Dr Jekyll and Mr Hyde*”), une nouvelle écrite par Robert Louis Stevenson et publiée en janvier 1886, qui a connu entre 1908 et 1996 au moins 13 adaptations cinématographiques, a inspiré cinq adaptations à la télévision, autant de bandes dessinées et une douzaine de chansons !

Ce cas est à rapprocher de la double nature ondulatoire et corpusculaire de la lumière et plus généralement de toutes les ondes et particules au niveau atomique.

Rappelons que, depuis la Grèce antique, les philosophes et scientifiques ont hésité entre deux conceptions ou représentations du phénomène lumineux, opposition culminant aux XVII^e - XVIII^e siècles avec Christian Huyghens (1629-1695), physicien néerlandais qui affirmait que la lumière était une onde, et Isaac Newton (1643-1727), physicien anglais qui affirmait qu'elle était due à des particules.

Le débat semblait tranché à la fin du XIX^e siècle, après les expériences d'interférences et de diffractions notamment du Français Augustin Jean Fresnel (1788-1827) et la théorie des ondes électromagnétiques de l'Écossais James Clerk Maxwell (1831-1879). Or en 1887 Rudolph Hertz (célèbre par la découverte des ondes hertziennes) et son élève Philipp von Lenard découvrent l'effet photoélectrique. En 1905, Albert affirme que la lumière, considérée alors comme une onde, est aussi une particule (le photon). 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 de produire de l'énergie électrique. Ce double aspect ondulatoire et corpusculaire est ensuite conceptuellement étendu à toutes les particules par Louis de Broglie (1925), puis confirmé expérimentalement. 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. Ces deux représentations sont intrinsèquement incompatibles, l'une (ondulatoire) étant un phénomène continu, l'autre (corpusculaire) étant un phénomène discret. J'ai développé dans une précédente communication (2) le fait qu'un tel être n'est en réalité ni une onde, ni un corpuscule, mais que c'est une entité physique en réalité inconnue qui peut être représenté mathématiquement de façon plus aisée dans certains cas par une onde, dans d'autres cas par une particule.

Ainsi un parallèle peut être établi entre les deux aspects corpusculaire et ondulatoire de la lumière (et des autres ondes et particules) et les deux facettes du même personnage que sont Dr. Jekyll et Mr. Hyde. Il est intéressant à ce propos de comparer les deux affiches des figures II.1 et II.2 : alors que la première semble laisser indiquer la possibilité de coexistence entre les deux aspects du personnage, la seconde indique clairement une fracture entre les deux représentations. En fait on ne peut voir les deux aspects du personnage ensemble, de même que les deux représentations de la lumière par exemple ne peuvent pas être utilisées pour décrire le même phénomène.



Figure II.1 : Affiche du film réalisé par Ruben Mamoulian (1931)



Figure II.2 : Affiche de Dr. Jekyll et Mr. Hyde

Il est aussi important de noter que la nouvelle de Stevenson a été publiée en 1886, donc bien avant la révélation de la dualité onde-corpuscule, de sorte que cette dualité est typiquement le fruit de l'imagination et n'a pu être inspirée par une

réalité scientifique. D'ailleurs, le Dr. Jekyll se transforme en Mr. Hyde après absorption d'une potion, de sorte que la dualité apparaît bien comme le résultat d'une alchimie et n'est aucunement liée à un phénomène physique. Il s'agit donc bien là d'un film de fiction sans rapport aucun avec la science.

III – Le passe-muraille : effet tunnel

“Le passe-muraille” est une nouvelle de Marcel Aymé publiée en 1943 : un excellent homme nommé Dutilleul possède le don singulier de passer à travers les murs sans en être incommodé ; après avoir connu des aventures ahurissantes, il finit par se retrouver prisonnier d'un mur. Cette nouvelle a inspiré au moins quatre adaptations cinématographiques entre 1951 et 2007. Les photos ci-dessous, tirées du début du film “Le passe-muraille” de Jean Boyer de 1951, montrent Bourvil dans le rôle de Dutilleul, passant le bras puis tout son corps à travers un mur.

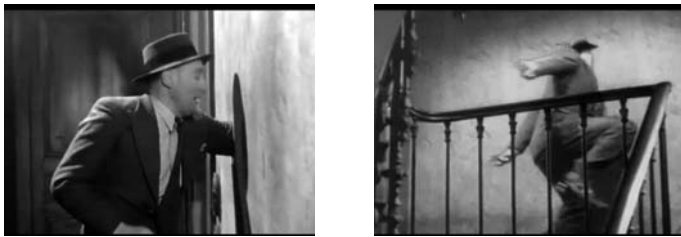


Figure III.1 : Photos tirées du début du film “Le passe muraille” de Jean Boyer (1951)

Comme indiqué plus haut, la mécanique quantique a pris naissance avec l'article de 1899 de Max Planck (1858-1647) ⁽¹⁾, qui étudiait alors le rayonnement du corps noir. En 1900 il publie la célèbre formule $E = h \nu$ (où h est la constante de Planck et ν la fréquence de la radiation lumineuse émise par le corps noir) selon laquelle l'énergie des atomes ne peut s'échanger que par multiples de quantités proportionnelles à la fréquence du rayonnement : mais cette formule est pour lui seulement un artifice mathématique, et c'est Einstein qui en 1905, en étudiant l'effet photoélectrique, donna à cette formule un sens physique en l'interprétant comme l'énergie contenue dans un photon, un “grain de lumière”. Ainsi les fondements de la théorie quantique ont mis du temps pour être élaborés : le modèle “primitif” de l'atome, envisagé comme des électrons orbitant autour du noyau tout comme les planètes autour du soleil, a été élaboré en 1913 par Niels Bohr. L'équation de Schrödinger (1887-1961), qui gouverne l'évolution des systèmes quantiques a été postulée en 1925 (et jamais mise en défaut après que des milliers d'expériences en aient testé les conséquences). C'est seulement en 1930 que Paul Adrien Dirac (1902-1984) publie son livre fondateur “*Principes de la mécanique quantique*”, où il montre que les deux approches, celle de Schrödinger et Heisenberg, ne sont en fait que deux représentations d'une même algèbre linéaire.

Marcel Aymé avait-il entendu parler de mécanique quantique ? C'est fort peu probable ! Toujours est-il que l'équation de Schrödinger prévoit que des particules puissent franchir une barrière, un mur, tout en conservant leur énergie. Ce résultat est schématisé sur les figures F.3.2 et F.3.3, le phénomène est le suivant :

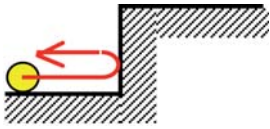


Figure III.2.a :
Mécanique classique

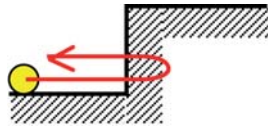


Figure III.2.b :
Mécanique quantique



Figure III.2.c : Flux
de particules quantiques

– Marche d'escalier : imaginons qu'une bille roule sur un plan horizontal et rencontre une marche d'escalier (figure III.2). En mécanique classique, elle rebondit et revient en arrière (figure III.2.a). En mécanique quantique, la particule pénètre un peu à l'intérieur de la marche avant de revenir en arrière (figure III.2.b) ; si l'on recommence l'expérience, la particule pénètre un peu plus ou un peu moins avant de repartir en arrière ; en fait, l'on n'est incapable de prédire la trajectoire exacte de la particule ; tout ce que l'on peut connaître, c'est la probabilité qu'à la particule de pénétrer à une certaine profondeur à l'intérieur de la marche avant de repartir en arrière : plus cette profondeur est grande, moins il est probable que la particule pénètre jusque là ; ainsi, si l'on pouvait prendre la photographie instantanée d'un flux de particules quantiques heurtant la marche, on observerait des particules à l'intérieur de la marche, avec une densité d'autant plus faible que l'on s'enfonce plus profondément à l'intérieur (figure III.2.c).

– Franchissement d'un mur : imaginons maintenant que notre particule quantique soit lancée non pas contre un escalier, mais contre un mur (figure III.3) : le comportement des particules heurtant la première face est le même que précédemment. Si l'épaisseur du mur est grande, supérieure à la profondeur de pénétration maximale des particules, pratiquement aucune particule n'atteint sa face postérieure, donc toutes les particules sont réfléchies après avoir pénétré plus ou moins profondément dans le mur (figure III.3.a). Mais si le mur est suffisamment mince (figure III.3.b), une partie des particules atteint la face de sortie, la traverse, et continue leur chemin : ces particules ont traversé le mur, c'est l'effet tunnel. Le nombre de particules traversant le mur est d'autant plus grand que le mur est plus mince. En pratique, pour les énergies habituelles rencontrées en électronique, l'effet tunnel se manifeste pour des électrons pour des épaisseurs inférieures à quelques nanomètres. En fait pour des énergies données, le coefficient de transmission de la barrière dépend de $\alpha a/m$ où a est l'épaisseur de la barrière, m la masse de la particule, et α une constante qui dépend de l'énergie de la particule et de la hauteur de la barrière. Ainsi :

- plus la particule est lourde, plus le coefficient de transmission est faible ;
- inversement, le neutrino, dont la masse est nulle a un coefficient de transmission égal à 1 quelle que soit l'épaisseur de la barrière : en fait un neutrino peut traverser la terre entière sans dommage.

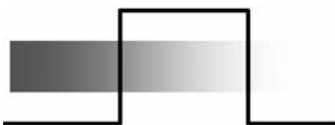


Figure III.3.a : Une barrière épaisse
n'est pas franchie

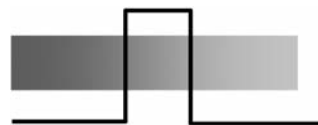


Figure III.3.b : Franchissement
d'une barrière mince par effet tunnel

L'effet tunnel est un phénomène typiquement quantique. La nouvelle de Marcel Aymé est donc une pure fiction. Si votre voiture garée un soir devant votre porte a disparu le lendemain matin, ne vous émerveillez pas qu'elle ait pu traverser les Alpes ou les Pyrénées par effet tunnel : faites une déclaration de vol à la police ou à la gendarmerie...

Aujourd'hui l'effet tunnel est une réalité physique qui ne peut être remise en cause, il a été démontré expérimentalement en 1958 par Leo Esaki (né en 1925) qui a obtenu le prix Nobel en 1973. On l'utilise couramment en électronique pour la fabrication de diodes à effet tunnel. Cet effet a par ailleurs donné naissance à un nouveau type de microscope, le microscope à effet tunnel (en anglais STM, Scanning Tunneling Microscope) inventé en 1981 par des chercheurs d'IBM, Gerd Binnig et Heinrich Rohrer, qui reçurent le Prix Nobel de physique pour cette invention en 1986. Cette nouvelle technique utilisant une pointe très fine terminée par un atome permet l'observation directe et aisée d'atomes et de structures atomiques de surfaces conductrices dans une large variété d'environnements (air, eau, huile, vide).

IV – Voyage dans le temps

Le voyage dans le temps, soit dans le passé, soit dans le futur, ou bien les deux, constitue une thématique privilégiée de romans, depuis le Moyen Age jusqu'à nos jours, en passant par "La Tempête" de Shakespeare (1611), le " Voyage au centre de la terre" de Jules Verne (1864), "La machine à explorer le temps" d'Orson Wells (1895), "le Voyageur imprudent" de René Barjavel (1943), etc. Un nombre considérable de films, bandes dessinées, séries télévisées, a fleuri soit en tant qu'œuvres originales, soit inspirées de ces romans. Toutes ces œuvres ont un point commun : l'exploration du passé ou la projection dans le futur ne pouvant pas se réaliser de façon "naturelle", elles utilisent des stratagèmes qualifiés de "scientifiques" : potions magiques, sorcellerie, effets paranormaux, ondes électromagnétiques, transmutation, etc., certains se référant explicitement à des théories scientifiques qu'à peu près personne ne peut comprendre, telle "La Théorie des cordes" de José Carlos Somoza (2007) (que soit dit en passant je n'ai pas lu), basé paraît-il sur une mise en application secrète et scientifique de la théorie des cordes, théorie qui tente de réunir la relativité générale et la mécanique quantique.

L'encyclopédie "libre" Wikipedia inventorie pas moins de 118 films faisant appel au thème du voyage dans le temps. J'y ajouterai à titre d'exemples deux films qui ne figurent pas dans cet inventaire :

– "FSX Nimitz retour vers l'enfer" réalisé par Don Taylor (1980), décrit un porte-avions doté de toute la puissance de frappe "moderne" (au sens des années 80) qui, pris dans une "tempête magnétique" d'une extrême violence (figure F.4.1), se retrouve au large de Pearl Harbour le 7 Décembre 1941, jour de l'attaque du Japon. Le cours de l'histoire sera-t-il changé ?

– "Retour vers le futur", de Robert Zemeckis (1985) raconte à l'opposé une histoire totalement farfelue d'un jeune homme qui se retrouve propulsé, à l'aide d'une voiture au moteur spécialement adapté (figure F.4.2), au temps de la jeunesse de ses parents et doit les faire se rencontrer afin d'exister.



Figure IV.1 :
le porte-avions Nimitz pris
dans une tempête magnétique



Figure IV.2 :
la voiture à remonter le temps
de "Retour vers le futur"

Dans ces deux films, les personnages sont transportés dans le passé, l'un par un moyen qui se veut crédible, l'autre de façon délibérément détachée de tout contexte scientifique. Leur retour dans le passé ne change pas le cours des choses, alors que dans "L'Effet papillon" (2004), de Eric Bress, un homme a le pouvoir de retourner dans son passé quelques instants, mais à chaque fois cela change toute sa vie.

Y a-t-il dans la physique matière à envisager de telles transformations ? Certainement pas, en tout cas jusqu'à présent. Cependant les lois de la mécanique classique sont réversibles. Par exemple, si l'on connaît la position et la vitesse d'un obus de canon au cours de sa trajectoire, on sait où et quand il va percuter le sol (on peut prévoir ce qui se passera dans le futur), mais on peut aussi reconstituer sa trajectoire (reconstituer le passé). Est-ce pour autant que nous soyons capable d'inverser la trajectoire de l'obus et de le faire entrer dans la bouche du canon d'où il a été tiré ? Certainement pas, pas plus que nous ne sommes capables de reconstituer un œuf qui s'est écrasé sur le sol après être tombé d'une table. Il faudrait pour cela, dans le cas simple du canon, soit remonter le temps, ce que nous ne savons pas réaliser sauf avec un projecteur de film que l'on rembobine, soit arrêter l'obus en vol et inverser exactement sa vitesse (notez qu'il faudrait aussi, pendant le temps du retour, faire souffler les vents dans le sens contraire de l'aller pour corriger la trajectoire de l'obus déviée par le vent, ce qui semble bien au delà de nos possibilités actuelles...). De surcroît, le second principe de la thermodynamique affirme que "l'entropie (NDLR : c'est à dire le désordre) d'un système isolé ne peut qu'augmenter".

Qu'en est-il en mécanique quantique ? C'est encore pire ! Ceci est lié au fait qu'en mécanique quantique, une mesure faite sur un même système peut donner des résultats différents, et de plus modifie l'état du système. Il s'agit là d'un postulat, qui contredit totalement la physique classique, selon laquelle si l'on recommence la même mesure dans les mêmes conditions on retrouvera le même résultat, et la mesure ne modifie pas l'état du système. En effet, la science a pour but de produire des "connaissances" à partir de méthodes d'investigation rigoureuses, vérifiables et reproductibles.

Nous pouvons comprendre aisément ce phénomène en étudiant la lumière polarisée. La polarisation est dite rectiligne si le champ électrique de l'onde électromagnétique oscille en conservant la même direction, dans le plan d'onde perpendiculaire à la direction de propagation (tout comme une corde qui vibrerait suivant une direction donnée perpendiculaire à la corde). Notons que la polarisation de la lumière, ou plus généralement d'une onde électromagnétique, est un phénomène couramment rencontré et utilisé. Donnons-en trois exemples :

– La lumière du ciel est en partie 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 modifier ainsi le contraste.

– La lumière polarisée est utilisée pour observer des images projetées en relief, au moyen de deux projecteurs munis de polariseurs orientés “perpendiculairement” l’un à l’autre. Les spectateurs portent chacun une paire de lunettes polarisantes dont les deux “filtres” sont orientés dans les directions correspondantes.

– Les ondes électromagnétiques utilisées en télévision terrestre (analogique ou numérique) ou par satellite, sont polarisées, en général horizontalement (d’où les antennes “râteau” horizontales).

Supposons qu’un faisceau lumineux soit polarisé verticalement (voir figure IV.3) : ceci peut être aisément obtenu en interposant, sur le trajet d’un faisceau lumineux quelconque, un filtre polariseur P orienté verticalement. Imaginons que nous recevions ce faisceau polarisé mais que nous ignorions sa direction de polarisation : comment la déterminer ?



Figure IV.3

Il nous suffit d’interposer, sur le trajet de ce faisceau polarisé, un autre filtre polariseur A (appelé “analyseur”), et de faire tourner ce filtre :

- 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 sont bloqués ;
- ayant ainsi repéré la direction (verticale) de polarisation du faisceau, orientons l’analyseur à 45° par rapport à cette verticale (figure F.4.3). 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, et la lumière sortant de l’analyseur est polarisée suivant la direction A . En terme de photons, cela signifie que la moitié des photons traverse l’analyseur, l’autre moitié est bloquée, et que les photons ayant traversé l’analyseur sont, à sa sortie, polarisés suivant la direction A . 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 composé 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 liée à l’appareil de mesure.

2) Le résultat de la mesure modifie en général l'état du système.

3) La valeur moyenne des différents résultats possibles portant sur un grand nombre de systèmes quantiques (ici un faisceau lumineux) redonne le résultat de la mesure "classique".

Revenons maintenant à la reconstitution du passé et à la prévision du futur. Considérons par exemple un système quantique possédant deux états observables que nous noterons $|0\rangle$ et $|1\rangle$ (ce système pourra être, comme dans l'exemple ci-dessus, un photon possédant deux états de polarisation), et supposons que ce système soit dans l'état $|y_1\rangle = 0,6 |0\rangle + 0,8 |1\rangle$. Si nous effectuons une mesure sur ce système, nous pouvons : soit trouver la valeur 0 avec la probabilité $0,6^2 = 0,36$ et dans ce cas après la mesure le système sera dans l'état $|0\rangle$; soit trouver la valeur 1 avec la probabilité $0,8^2 = 0,64$ et dans ce cas après la mesure le système sera dans l'état $|1\rangle$. Mais si, au lieu d'être dans l'état $|\psi_1\rangle$, le système avait été dans l'état $|\psi_2\rangle = 0,71 |0\rangle + 0,71 |1\rangle$, la même mesure aurait donné la valeur 0 avec la probabilité $0,71^2 = 0,5$ ou a valeur 1 avec la probabilité 0,5. Ainsi, lorsqu'on effectue la mesure et que l'on trouve par exemple la valeur 0, l'on est totalement incapable d'assurer que le système se trouvait avant la mesure dans l'état $|\psi_1\rangle$ ou dans l'état $|\psi_2\rangle$ ou dans n'importe quel autre état combinaison de $|0\rangle$ et $|1\rangle$: nous sommes incapables de reconstituer le passé à partir d'une mesure présente. Tout ce que nous pouvons faire à partir du présent, ce sont des conjectures sur le passé, au mieux assorties de la connaissance que telle conjecture a plus de probabilité de s'être trouvée que telle autre conjecture. Pour la même raison nous ne pouvons pas connaître le futur. En effet, pour prévoir l'évolution du système, il faut effectuer une mesure, donc modifier son état, et par conséquent modifier son évolution : toute action que nous entreprenons aujourd'hui modifie le futur !

Ainsi conceptuellement, du point de vue de la mécanique quantique :

- nous ne pouvons pas remonter dans le passé ni le reconstituer,
- nous pouvons prédire le futur sous peine de le modifier.

Notons au passage qu'un système classique que l'on ne peut observer que dans deux états, que nous noterons $|0\rangle$ et $|1\rangle$, auxquels nous pouvons de façon arbitraire attribuer les valeurs 0 et 1, s'appelle un bit. Ce système ne peut se trouver que dans l'un ou l'autre de ces deux états, et on ne peut mesurer que les valeurs 0 ou 1. Au contraire un bit quantique (appelé "qubit") peut se trouver dans n'importe quelle combinaison $|\psi\rangle = \alpha|0\rangle + \beta|1\rangle$ où α et β peuvent prendre des valeurs quelconques (réelles ou complexes), mais une mesure portant sur ce système ne pourra donner que les valeurs 0 ou 1.

V – Vitesse supraluminique

Il s'agit d'objet voyageant à une vitesse supérieure à celle de la lumière. Une telle éventualité n'a posé aucun problème jusqu'à la fin du XIX^e siècle. Ce n'est qu'à partir de la découverte de la relativité restreinte en 1905 lorsqu'Einstein a postulé qu'aucune information ni aucune énergie ne pouvait se déplacer à une vitesse supérieure à celle c de la lumière dans le vide, que le fait d'imaginer des vitesses supraluminiques a posé problème.

Depuis lors, de nombreuses expériences ont tenté de mettre en évidence des vitesses supraluminiques contredisant la théorie de la relativité, aucune n'a été concluante, que ce soit en physique ou en astrophysique. Seul l'effet Tcherenkov a mis en évidence le déplacement d'électrons dans l'eau à une vitesse v supérieure à la vitesse de propagation de la lumière dans l'eau, provoquant une onde de choc semblable à celle provoquée par la proue d'un navire se déplaçant dans l'eau à une vitesse supérieure à la vitesse de propagation des ondes. Mais cette vitesse v reste inférieure à c . En 2011, les chercheurs du programme de recherche OPERA ont cru mesurer des vitesses de déplacement de neutrinos supérieures de 7,4 km/s à celle de la lumière ($c = 299\,792\,458$ m/s), mais ces résultats n'ont pas été confirmés. En astrophysique des vitesses supraluminiques apparentes ont été observées dans des jets de quasars, mais il s'agit là d'un effet de parallaxe, les vitesses réelles sont inférieures à c . En mécanique quantique, un photon ou un électron peut traverser par effet tunnel une barrière quantique plus vite que la lumière pour une distance équivalente, ce temps étant évalué par l'observation du sommet du paquet d'ondes correspondant, avant et après la barrière. Ce phénomène est appelé effet Hartman (ou effet Hartman-Fletcher), mais il ne peut être utilisé pour le transport d'information ou d'énergie supraluminique.

On peut aussi évoquer l'idée d'une distorsion de l'espace, qui constitue un moyen détourné pour aller d'un point A à un point B en un temps inférieur à celui que met la lumière. Ceci peut se concevoir en imaginant deux points A et B sur une feuille de papier : pour aller d'un point A de la feuille à un autre point B , il faut un certain temps t en se déplaçant à la vitesse de la lumière. Mais si nous sommes capables de replier la feuille (donc de distordre l'espace) pour amener les points A et B en coïncidence, le voyage de A à B dure un temps très court, beaucoup plus petit que t , donnant ainsi l'impression de voyager à une vitesse très supérieure à celle de la lumière. Transposé à notre espace, ceci implique soit que nous puissions le tordre (par quel moyen ?) pour amener en coïncidence justement le point de départ et le point de destination, soit qu'il existe des espaces parallèles (ce que prévoit la théorie des cordes) que nous puissions utiliser pour voyager en "court-circuitant" le trajet "normal".

Pour les déplacements intergalactiques des vaisseaux spatiaux qui apparaissent dans de nombreux ouvrages ou films de science-fiction, il est nécessaire de voyager plus vite que la lumière si l'on veut avoir le temps de mener une action au cours d'une vie ! Rappelons en effet que l'étoile la plus proche du Soleil, Alpha du Centaure, en est distante de 4,22 années lumière. En d'autres termes, si l'on réduisait l'orbite de la Terre à la dimension du stade de France, le soleil serait un ballon de 20 cm de diamètre au centre du terrain de football, la terre serait une bille de 2 mm de diamètre faisant le tour du terrain, et Alpha du Centaure serait à 13 000 km de là, soit en Australie !

– La figure V.1 est tirée d'un épisode de "Star Wars" ("*La Guerre des étoiles*", saga cinématographique de science-fiction créée par George Lucas en 1977, et dont les différents épisodes se sont échelonnés jusqu'en 2005). Elle montre un vaisseau spatial voyageant au milieu des étoiles et des météorites. Le monde de *Star Wars* est inspiré de nombreuses œuvres cinématographiques (serials, western, cinéma japonais), mais aussi littéraires (ouvrages d'Isaac Asimov et de J. R. R. Tolkien notamment) et de faits historiques réels. En fait, il s'agit d'une transposition, dans le monde intergalactique, de péplums antiques ou modernes dans lesquels les cavaliers

et les chars d'assaut sont remplacés par une armada de vaisseaux spatiaux, entrecoupés de scènes chevaleresques et de combats singuliers du type western, et il est intéressant de voir le mélange de scènes suggérant des techniques d'avant garde et des méthodes archaïques. Ainsi dans la même scène du combat final, on voit un duel moyenâgeux du type chevaleresque au sabre laser (figure V.2) auquel succède l'émission d'arcs électriques spectaculaires jaillissant du bout des doigts (figure V.3), dont l'auteur périt quelques secondes plus tard, tous simplement précipité dans le vide ! A son tour, Star Wars a influencé une génération de réalisateurs et contribué à la création de nouvelles techniques dans le domaine du cinéma, notamment en ce qui concerne le montage et les effets spéciaux.



*Figure V.1 :
voyage interstellaire
tiré de Starwars*



*Figure V.2 :
Star Wars : combat au sabre
laser dans la scène finale*

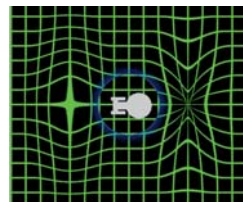


*Figure V.3 :
Star Wars : scène
du combat final*

– La figure V.4 est tirée d'un épisode de Star Trek, qui montre l'accélération d'un vaisseau spatial rendu par un défilement de traits blancs qui s'accélère, associé à l'allumage des réacteurs. *Star Trek* a été créé par Gene Roddenberry dans les années 1960, il regroupe six séries télévisées, a inspiré onze longs métrages (le dernier est sorti le 6 mai 2009), des centaines de romans et des dizaines de jeux vidéo. L'ensemble des séries télévisées à elles seules est considéré comme l'un des plus grands phénomènes cultes des temps modernes. Cette série, contrairement à beaucoup d'autres, se donne une apparence pseudo-scientifique, en "expliquant" comment est créée une vitesse supraluminique : en produisant une distorsion de l'espace, mais utilisée de façon totalement différente de celle évoquée plus haut. Elle est obtenue au moyen d'un "moteur à distorsion" qui comprime l'espace à l'avant du vaisseau et le dilate à l'arrière (figure V.5), ce qui crée une "bulle", c'est à dire une vague qui se déplace plus vite que la lumière et sur laquelle le vaisseau surfe ; l'énergie considérable nécessaire pour créer cette distorsion de l'espace est (tout simplement !) obtenue en mélangeant de la matière et de l'antimatière ; on peut ainsi atteindre des "vitesses de distorsion" allant jusqu'à 10, ce qui représente environ 20 000 fois la vitesse de la lumière !



*Figure V.4 : Star Trek :
accélération d'un vaisseau spatial*



*Figure V.5 : Star Trek :
distorsion de l'espace créée
par le moteur du vaisseau spatial*

– Capitaine Flam fait encore mieux ! Cette série télévisée d’animation japonaise réunit 13 histoires indépendantes découpées chacune en 4 épisodes de 22 minutes, diffusées en France à partir de 1979. On y explique, dans l’épisode “l’Empereur de l’Espace 1/2” que le cyberlab, grâce au “volant hyperspatial”, parcourt 1500 années lumières en une seconde, ce qui implique que sa vitesse s’élève à 31 536 000 fois la vitesse de la lumière !

Un grand nombre de romans et séries télévisées du type “space opera” ont fleuri dans les années 1960 et 1980 (Star Wars, Star Trek, Capitaine Flam, Albator, Goldorak, Ulysse 31, etc.), au moment de l’engouement du public pour la conquête spatiale.

On voit donc ici encore que les explications dites scientifiques sont aussi imaginaires et dénuées de fondement que les scénarios ou les histoires qui sont contés.

VI – Télépathie

La télépathie ou transmission de pensée est la communication directe entre deux esprits dont l’éloignement interdit toute communication par le moyen des sensations usuelles. Elle suppose l’existence d’un émetteur et d’un récepteur, et pour être perçue consciemment, il est nécessaire que celui-ci au moins soit dans un état de réceptivité approprié, c’est à dire qu’il écoute son subconscient.

Cette propriété a été exploitée dans de nombreux ouvrages, films ou séries télévisées, par exemple la série Star Trek, le livre “Shining” de Stephen King et le film de Stanley Kubrick qui en est tiré, la série “Harry Potter” où la télépathie est une capacité dénommée “légilimancie”, branche de la magie pratiquée par Harry Potter et Voldemort qui ont entre eux un fort lien magique, une partie de l’âme de Voldemort s’étant enfermée dans Harry Potter lors de la tentative d’assassinat de Harry Potter dans son berceau par Voldemort. Alfred Bester est un précurseur en ce domaine avec son livre “L’Homme démoli” des années 1950, où la télépathie est associée à une psychothérapie pour “démolir” une personnalité criminelle. Outre Star Trek, la télépathie apparaît dans plusieurs grandes sagas telle “Babylon 5”, “Alien”, “X Men”, etc. C’est aussi un thème de prédilection des tours de magie, où elle apparaît souvent comme un stratagème associé à l’hypnose, supposée créer une relation privilégiée entre émetteur et récepteur.

Mais cette relation peut aussi être naturelle, et les jumeaux sont souvent cités comme possédant des liens de télépathie. Bien que ces facultés n’aient jamais été démontrées, il est surprenant de constater que les services secrets tant soviétiques qu’américains ont utilisé la télépathie comme technique d’espionnage pendant la guerre froide. Ainsi lors de la prise d’otages américains par les iraniens en novembre 1979, des agents ont tenté de localiser le lieu de détention des otages et d’appréhender leurs conditions de vie, disent-ils avec succès. Les américains sont allés encore plus loin en essayant de localiser par la pensée des bases militaires soviétiques en se concentrant sur un plan, par exemple à Semipalatinsk au Kazakhstan : il ne s’agissait plus là de télépathie, puisqu’il n’y avait pas de communication avec une autre personne, mais de “clairvoyance”. Un agent américain du nom de Joseph Mac Moneagle, aurait même détecté de cette façon la construction à l’intérieur d’un bâtiment d’un sous-marin soviétique de type Typhoon, dans le cadre du programme

Star Gate alors secret, il aurait ainsi réussi près de 150 missions de clairvoyance sur 200 et obtenu pour cela 38 décorations. Ce type d'expériences de la CIA s'est étagé sur une vingtaine d'années, puis a été abandonné.

Qu'en est-il en mécanique quantique ? Considérons deux particules, pouvant chacune se trouver dans l'un ou l'autre de deux états, désignés par $|0\rangle$ et $|1\rangle$, ou encore dans une combinaison de ces deux états (qui peuvent être par exemple les deux états de spin d'une particule, ou les deux états de polarisation d'un photon, etc.). Il est possible d'établir un lien quantique entre ces deux particules de façon à ce que le système qu'elles constituent soit dans un état dit "intriqué", en d'autres termes dans un état tel que toute action sur une particule ait un effet non seulement sur la particule sur laquelle on agit, mais aussi sur l'autre particule ; ou encore : toute modification d'une particule affecte aussi l'autre particule. On peut se représenter ce lien comme une barre qui relie deux disques, telle un haltère : toute rotation d'un disque entraîne une rotation équivalente de l'autre disque, à ceci près que dans le système quantique, la liaison entre les deux particules est immatérielle. Cette intrication peut être détruite au moindre contact du système, c'est à dire de l'une des deux particules, avec l'extérieur, c'est la "décohérence". Imaginons qu'il soit possible de construire le système de deux particules (1) et (2) dans un état intriqué noté $|\psi\rangle$, et qu'il soit possible de séparer physiquement les deux particules (1) et (2) en conservant le système dans cet état $|\psi\rangle$. 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) au moyen d'un appareil similaire. Avant d'effectuer la mesure, Alice et Bob savent que la particule sur laquelle portera leur mesure n'est pas dans un état pur, 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 50 % de chances de trouver leur particule dans l'état $|0\rangle$ et 50 % de chances de la trouver dans l'état $|1\rangle$, c'est à dire à 50 % de chances de trouver le résultat 0 et 50 % de chances de trouver le résultat 1. Cependant, si Alice effectue la mesure et trouve le résultat 0, alors il est *certain* que si Bob effectue sa mesure il trouvera le résultat 1, 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.

On peut comparer ce problème à celui des 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 boule est placée dans la valise de Bob qui part pour la destination B. Ni Alice ni Bob se connaissent la couleur de la boule qu'ils emportent dans leur valise, ils savent seulement qu'une boule est blanche, l'autre est rouge. Arrivés à destination, Alice ouvre sa valise : 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 (c'est à dire mis les boules dans les valises) sait quelle boule trouvera Alice et quelle boule trouvera Bob. Dans le cas quantique au contraire, chaque particule n'est pas dans un état bien défini, mais dans un mélange d'états, il est impossible de prévoir quelle valeur 0 ou 1 trouvera Alice, c'est la mesure d'Alice elle-même qui "forcera" la particule (1) à se trouver dans un état, et si on recommence l'expérience elle trouvera peut-être l'autre état. Et une fois l'état de la particule d'Alice déterminé par

la mesure d’Alice, l’état de la particule de Bob bascule automatiquement et immédiatement dans l’autre état. Ainsi l’observation de la particule (1) agit non seulement sur la particule (1) mais aussi sur la particule (2) qui lui est couplée, même à distance. 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 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. Il fallut attendre les expériences de A. Aspect *et al.* (3, 4, 5) pour apporter la preuve de cette liaison distante dématérialisée.

VII – Téléportation

Téléportation en science-fiction

Le terme “téléportation” a été inventé par l’américain Charles Fort dans le livre “*Lo!*” paru en 1934 en feuilleton dans la revue “Astounding Stories”.

La téléportation d’un objet d’un point A à un point B (d’une planète à une autre, par exemple) n’est *pas* le déplacement physique de l’objet de A vers B. C’est la “dématérialisation” de l’objet en A, l’envoi d’un signal de A vers B contenant les “plans” de l’objet, puis la “reconstruction” (ou “apportation”) de l’objet au point B. La reconstruction se fait à partir d’atomes qui se trouvent déjà en B. Par conséquent, aucune matière ne voyage, seulement de l’information. L’objet en B n’est donc pas le même que l’objet en A (il n’est pas fait des mêmes atomes) mais plutôt une copie parfaite, un clone de l’objet. Ceci implique deux choses : la disparition de l’objet en A, et la possibilité de réaliser éventuellement plusieurs clones en B.

La téléportation est un thème privilégié de fiction, présent dans la littérature bien avant qu’il n’apparaisse en sciences et bien avant que le nom de téléportation ait été inventé. Il se confond alors parfois avec la faculté de voyager à une vitesse supraluminique, caractéristique qui à l’époque n’était en aucune manière dérangeante, puisque ce n’est que depuis la théorie de la relativité restreinte énoncée par Einstein en 1905 que la vitesse de la lumière est considérée comme une limite infranchissable. Pour ne citer que quelques exemples de nouvelles ou de romans :

- dans la fameuse histoire d’Aladin (ajoutée au début des années 1700 par Antoine Gaillard à sa traduction des Mille et une nuits), les djinns sont décrits comme ayant le pouvoir magique de se déplacer instantanément entre la Chine et le Maroc.

- la légende fondatrice du royaume de Champa, situé dans la zone centrale du Viet Nam entre les II^e et XVII^e siècles, fait état d’une paysanne (la Dame de Po Nagar) qui épousa un empereur chinois dont elle eut deux enfants. Lorsqu’elle voulut retourner dans sa famille, l’empereur l’en empêcha : elle jeta du santal magique dans l’océan, et alors disparut de Chine avec ses deux enfants et réapparut au royaume de Champa dont elle devint reine.

– la nouvelle brève “the Desintegration machine” de Arthur Conan Doyle (1929) fait état de téléportation.

– la série Harry Potter met en œuvre plusieurs types de téléportations, relevant tous de la magie : tantôt le magicien disparaît d’un endroit et apparaît à un autre ; à cause des dangers liés à l’apparition, les magiciens doivent être expérimentés et diplômés, les autres peuvent utiliser de la poudre ou se faire transporter à des endroits prédéterminés par des objets enchantés...

– l’un des plus anciens romans relatant la téléportation humaine est probablement “L’homme sans corps” (“The man without a body”) de Edward Page Mitchell (1877) où la batterie alimentant l’appareil de téléportation tombe en panne durant l’opération, de sorte que seule la tête du personnage est téléportée.

– on le voit, la téléportation n’est pas sans risque, et l’un des ouvrages qui en exploitent le mieux les dangers est sans doute la nouvelle “La mouche” de George Langleman (1957), qui a fait l’objet de deux adaptations cinématographiques en 1958 et 1986 : dans la cabine de reconstruction se trouve une mouche dont les gènes se mêlent à ceux de l’homme dont le corps se transforme progressivement (figure VII.1).

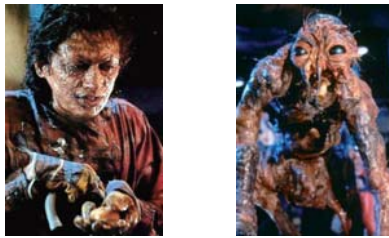


Figure VII.1 : deux étapes dans la transformation du héros Seth Brundle prenant l’aspect d’une mouche après la téléportation manquée dans le film “La mouche” de David Cronenberg (1987)

Bien entendu, le thème de la téléportation apparaît dans de nombreuses séries télévisées, parmi lesquelles “Doctor Who”, en deux séries, parue en 1964 et qui se poursuit encore de nos jours, considérée comme la plus grande série télévisée du monde avec près de 800 épisodes. Citons aussi les séries “Lost” (“Les disparus”), “Stargate”, “X-Men”, “L’odyssée de l’espace”, etc.

La série télévisée “Star Trek”, déjà évoquée au paragraphe 5 ci-dessus, est assez emblématique de la téléportation, car ce procédé est ici couramment utilisé. Lorsque le navire *Enterprise* arrive à proximité d’une planète sur laquelle des membres de son équipage désirent se rendre, ceux-ci se dématérialisent pour se recomposer sur la planète en question (et de même au retour). Ici, ce ne sont pas les plans du personnage qui sont envoyés de A vers B, le personnage est téléporté sous forme d’énergie. Interrogé sur le choix de la téléportation comme effet spécial, le réalisateur de la série le justifia par le fait que les techniques d’effets spéciaux de l’époque rendaient celui-ci plus facile et moins coûteux que de faire atterrir la maquette de l’*Enterprise* de façon réaliste sur un paysage naturel. La figure VII.2 est tirée d’une séquence de dématérialisation sur une planète de deux personnages, qui sont reconstruits (figure VII.3) dans le vaisseau *Enterprise*.



Figure VII.2 : Star Trek :
Dématérialisation de deux
personnages sur une planète.



Figure VII.3 : Star Trek :
Reconstruction de ces deux
personnages dans le vaisseau Enterprise.

Cependant, dans le “Manuel technique” spécialement conçu pour la seconde série, la téléportation est décrite dans Star Trek comme la dématérialisation de la personne, puis l’envoi *des atomes qui la composent* vers la destination choisie, puis la reconstruction de la personne avec les mêmes atomes. Il y a là transfert de matière, et ne peut donc pas y avoir clonage, en contradiction avec une scène de cette même série, où deux copies d’un même personnage sont créées.

Téléportation en mécanique quantique

Qu’en est-il en mécanique quantique ? La téléportation existe bel et bien, mais pas sous la forme sous laquelle elle apparaît en science-fiction. Elle utilise les états intriqués évoqués au paragraphe 6 ci-dessus, où l’on a vu qu’une modification sur une des deux particules intriquées se répercute *instantanément* sur l’autre particule.

Alice située au point A (qui peut être la planète Terre) veut transmettre à Bob situé au point B (qui peut être la planète Mars) un message X , dont elle ne connaît pas le contenu, composé de qubits c’est à dire de bits quantiques. Il lui est possible de le transférer à distance, via une opération appelée de façon très médiatique “téléportation” (6). Le procédé utilise deux canaux de communication : un canal quantique et un canal classique. Les étapes sont les suivantes.

Le qubit X se trouve dans un état $|\psi\rangle$: $|\psi\rangle = \lambda |0\rangle + \mu |1\rangle$ (8.1)

L’état $|\psi\rangle$ est une combinaison des états de base $|0\rangle$ et $|1\rangle$, mais bien évidemment Alice ne connaît pas les coefficients λ et μ de cette combinaison, car si elle effectuait une mesure elle trouverait soit le résultat $|0\rangle$ soit le résultat $|1\rangle$, et certainement pas $|\psi\rangle$. Alice souhaite transmettre ce qubit à Bob, c’est à dire faire connaître à Bob les coefficients λ et μ qu’elle ignore elle-même !

Pour cela, elle dispose d’un qubit B qu’elle va envoyer à Bob. La téléportation va consister à transférer l’état $|\psi\rangle$ du qubit X vers le qubit B . Ceci se fera en quelques étapes, que l’on peut considérer comme un algorithme quantique.

- Etape 1 : Alice prépare le qubit B dans un état connu, par exemple l’état $|0\rangle$, et un qubit auxiliaire A qu’elle prépare dans le même état $|0\rangle$. Dans l’état initial, Alice possède donc les trois qubits X , A et B (figure VII.4 étape 1).
- Etape 2 : Alice intrique les qubits A et B (figure VII.4 étape 2).

- Etape 3 : Alice conserve les qubits X et A et envoie le qubit B à Bob (figure VII.4 étape 3). Cette étape est particulièrement délicate, car la moindre perturbation, le moindre contact extérieur rompt la liaison entre les qubits A et B , d'où la difficulté considérable d'effectuer des téléportations à grande distance.
- Etape 4 : Après que Bob ait reçu son qubit, Alice intrique les qubits X et A (figure VII.4 étape 4) : ceci a deux effets : d'une part, étant donné qu'on touche au qubit A , le qubit B est modifié en conséquence ; d'autre part la liaison entre A et B est rompue. Le fait qu'on ait réalisé sur A une opération bien spécifique (intrication avec X) fait que le qubit B ne s'établit pas dans n'importe quel état. On peut montrer qu'il ne peut s'établir que dans quatre états possibles, l'un des ces quatre états étant justement l'état dans lequel se trouvait le qubit X au départ. Dans 25 % des cas, le qubit B de Bob est dans l'état où était le qubit X d'Alice A à l'étape 1, mais ni Alice ni Bob ne connaissent cet état. Dans tout les cas, l'état du qubit X d'Alice est modifié, il est maintenant intriqué avec celui du qubit auxiliaire A .
- Etape 5 : Alice désintrique les qubits A et X (figure VII.4 étape 5), par une opération spéciale que l'on désigne par "mesure de Bell". A l'issue de cette étape, les particules étant désintriquées, la mesure de chacune peut donner soit 0, soit 1, de sorte que le système peut se trouver dans l'un des quatre états $|0\rangle|0\rangle$, $|0\rangle|1\rangle$, $|1\rangle|0\rangle$, ou $|1\rangle|1\rangle$. Ceci clôt l'utilisation du canal quantique.
- Etape 6 : Alice communique le résultat obtenu à Bob par un moyen de transmission classique quelconque : par le marathonien Qubitidès qui s'écroule en arrivant à destination, ou par pigeon voyageur, téléphone, e-mail, ou tout autre moyen de communication. Dans tous les cas l'information parvient à Bob au bout d'un temps supérieur ou égal à celui que met la lumière pour parcourir la distance qui sépare Alice de Bob. Cette information permet à Bob de connaître l'état du qubit B , et de le rétablir dans l'état $|\psi\rangle$ dans lequel se trouvait le qubit X au début.

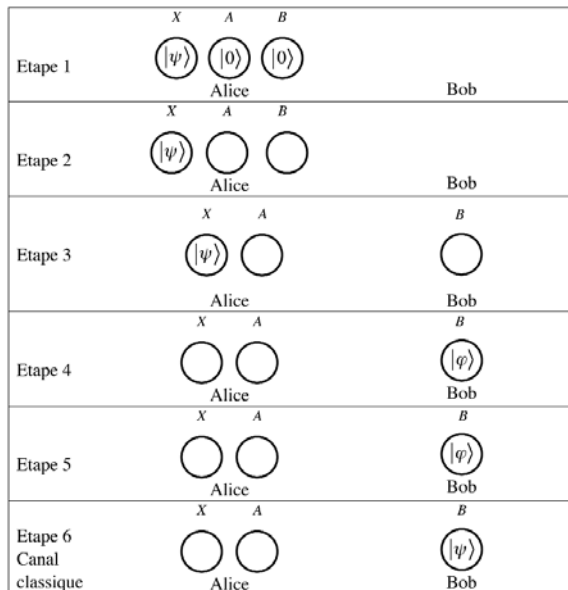


Figure VII.4 : Etapes de la téléportation quantique

Ainsi, dans tous les cas, grâce à la mesure effectuée sur le système conservé par Alice après désintrication :

- le qubit de Bob se trouve dans l'état initial de celui X d'Alice : il y a bien eu téléportation, c'est à dire transfert de l'état d'Alice vers Bob, avec destruction de l'état initial X d'Alice : l'état du qubit X d'Alice a été copié sur le qubit B de Bob.
- alors qu'Alice était dans l'impossibilité de savoir dans quel état était son qubit X , à l'issue de la téléportation aussi bien Alice que Bob savent dans quel état se trouve le qubit B de Bob et par conséquent dans quel état se trouvait le qubit X d'Alice.
- le qubit B de Bob ne peut être de façon certaine dans l'état du qubit X d'Alice qu'après que Alice ait transmis à Bob le résultat de sa mesure de Bell, cette transmission se faisant par voie classique donc à une vitesse inférieure ou égale à celle de la lumière.

Il en résulte que cette téléportation :

- est instantanée pour ce qui concerne les modifications des qubits (canal quantique),
- n'est pas instantanée pour ce qui concerne le transfert d'information (canal classique),
- *n'est pas un transfert de matière* (le qubit X d'Alice est conservée par Alice et son état est détruit).

Il est important de remarquer que ni Alice ni Bob n'ont accès à l'état initial du qubit X : toutes les opérations sont effectuées "en aveugle" sur un qubit dont ils ne connaissent pas l'état. Cette possibilité d'agir sur un qubit dont on ne connaît pas l'état joue un rôle fondamental dans le calcul quantique, elle est en particulier à la base des codes quantiques de correction d'erreur.

La téléportation quantique a d'abord été réalisée avec des ions piégés simultanément en 2004 par une équipe américaine (7) et une équipe autrichienne (8). Actuellement, elle est réalisée sur des photons. Ces derniers mois ont vu des avancées spectaculaires dans le domaine de la téléportation quantique. Après l'exploit d'une équipe chinoise qui a battu un record de distance en transférant une particule à 97 kilomètres (9), Anton Zeilinger et son équipe de l'Université de Vienne sont parvenus à téléporter des états quantiques entre deux îles des Canaries, sur une distance de 143 km (10).

Cryptographie quantique

Supposons qu'Alice veuille communiquer à Bob un message secret, constitué de qubits X . Ils se sont partagés au préalable deux qubits intriqués A et B (il faut autant de couples A, B que de qubits X à transmettre) : Alice intrique X et A ce qui transfère immédiatement de l'information à B . Cette information ne peut pas être interceptée par un espion, car ce contact extérieur détruirait l'intrication et par conséquent modifierait le message de façon incontrôlable. Alice désintrique alors le A et X et mesure l'état résultant. Elle communique ce résultat à Bob, cette communication peut se faire en clair (si elle est interceptée par un espion, elle ne lui est d'aucune utilité car l'information importante est l'état de B), et à partir de cette donnée Bob reconstitue sur B l'état dans lequel se trouvait X , et par conséquent lit le message. Dans le processus de mesure d'Alice, l'état de X est détruit. Ainsi le message est transmis à Bob sans aucun risque d'être intercepté ni décrypté. De nombreuses recherches sont actuellement développées pour mettre en œuvre une telle cryptographie quantique, qui intéresse au plus haut point aussi bien les communications militaires que civiles (transferts de fonds par carte bancaire, etc.).

Ordinateur quantique

Le bit classique est un système qui ne peut se trouver que dans deux états, que nous pouvons désigner par $|0\rangle$ et $|1\rangle$, et qui ne peuvent prendre que deux valeurs, auxquels on peut attribuer par convention les valeurs 0 et 1. Typiquement, dans un ordinateur, les systèmes capables de se présenter sous ces deux états sont des “portes” construites à base de transistors, ceux-ci pouvant être dans un état “bloqué” (ils ne laissent pas passer le courant électrique) ou “saturé” (ils laissent passer le courant). Un ordinateur classique consiste en un assemblage de bits que l’on peut combiner les uns aux autres de manière simultanée ou séquentielle pour effectuer des calculs.

Certains systèmes quantiques peuvent être observés sous deux états, que nous désignerons aussi par $|0\rangle$ et $|1\rangle$, ce sont par exemple le spin de particules, ou les états de polarisation (horizontale et verticale) de photons, etc. Lorsqu’on observe un tel système dans l’état $|0\rangle$, on mesure une quantité qu’on peut par convention prendre égale à 0, et lorsqu’on l’observe dans l’état $|1\rangle$, on mesure une autre valeur qu’on peut par convention prendre égale à 1. Comme nous l’avons vu, plus haut, un tel système est appelé “bit quantique” ou “qubit”. Mais contrairement au bit classique qui ne peut se trouver que dans les états $|0\rangle$ ou $|1\rangle$, le qubit peut se trouver dans un état $|\psi\rangle = \alpha|0\rangle + \beta|1\rangle$ où α et β peuvent prendre n’importe quelles valeurs (réelles ou complexes). Cependant, lorsqu’on effectue une mesure sur ce qubit, ou bien on le met dans l’état $|0\rangle$ et on trouve la valeur 0 (avec la probabilité $|\alpha|^2$), ou bien on le met dans l’état $|1\rangle$ et on trouve la valeur 1 (avec la probabilité $|\beta|^2$). Ainsi le qubit contient une quantité d’informations considérablement supérieures au bit classique, et l’on conçoit alors qu’un ordinateur quantique comporte une puissance de calcul potentiellement incomparablement plus grande qu’un ordinateur classique. La réussite d’expériences de téléportation démontre la faisabilité d’algorithmes quantiques. Néanmoins de tels algorithmes nécessitent d’intriquer des états, et le moindre contact extérieur détruit l’intrication et donc modifie l’algorithme et introduit des erreurs incontrôlables. En particulier, il est impossible de prélever des informations en cours de calcul, pour effectuer des tests, sans modifier de façon incontrôlée le résultat. On conçoit que de nombreux laboratoires de recherche publics ou privés travaillent sur ce sujet.

VIII – Conclusion

Le lecteur aura peut-être été quelque peu déçu de constater que la science-fiction contient presque exclusivement de la fiction et pratiquement pas de science. En fait les termes scientifiques que contiennent ces ouvrages (littéraires, cinématographiques ou autres) ont pour but soit d’impressionner le public, soit de donner l’apparence d’un sérieux qui n’existe pas plus là que dans les fictions tout court. On pourrait donc donner à ces ouvrages simplement le nom de “fictions”, car ils ne donnent pas en général de la science et des scientifiques une image conforme à la réalité. Mais les œuvres d’art n’ont que faire de la réalité : leur but est d’émouvoir ou de faire rêver. Alors pourquoi ne pas affubler certaines fictions du vocable “science”, si cela permet de faire rêver un peu plus, en ajoutant à l’imaginaire l’espoir lui aussi imaginaire que peut-être dans un lointain futur la science nous

permettra d'atteindre les possibilités décrites ! Après tout le film "Amadeus" de Milos Forman est une "histoire fiction" qui contient, presque de bout en bout, une compilation d'erreurs ou de mensonges, il n'en est pas moins un chef d'œuvre...

Laissons nous donc emporter par le rêve (ou le cauchemar !) qu'un jour la science rejoindra la fiction. Aujourd'hui l'on est capable de téléporter un rayon laser, c'est à dire des photons, mais rien ne s'oppose en principe à ce que l'on puisse téléporter d'autres particules, des atomes, des molécules : celle-ci pouvant se décrire par une fonction d'onde, on pourrait connaître l'état d'une molécule sans rien savoir de celui des atomes qui la composent. Il sera même probablement possible d'ici quelques dizaines d'années de téléporter des petits virus, c'est à dire une première forme de vie. Et si une petite structure de matériel génétique pouvait être téléportée, comme celle d'un virus, ne pourrait-on pas téléporter un chromosome, et même un génome entier, celui de l'être humain ? Mais souvenons-nous que dans le processus de téléportation la particule initiale est détruite : la téléportation est d'abord un assassinat, en téléportant un être vivant, on commence par le tuer, en espérant qu'il se reconstruise ailleurs : pouvons-nous accepter dans ces conditions la téléportation (à supposer qu'elle soit un jour possible) d'un être humain ? Et lorsqu'on aura téléporté le corps, qu'en sera-t-il de l'âme ? Qu'est-ce que l'âme ? Est-elle attachée au corps, auquel cas on pourrait la téléporter avec lui, mais elle disparaîtra un jour avec lui, ou bien est-ce une entité détachée du corps, auquel cas qu'advient-il de l'âme après téléportation du corps, peut-on cloner un corps sans son âme ?

Il n'en reste pas moins que la téléportation est prise très au sérieux, au point que, en 2001, l'Armée de l'Air des États-Unis mandata le Dr. Eric W. Davis pour une étude scientifique sur ce sujet. Il soumit son rapport en août 2004. Le rapport Davis fut très controversé de par sa recommandation en faveur de recherches plus poussées de la téléportation psychique. Il définit en effet cinq types de téléportation et recommanda de développer les programmes de recherche scientifique sur quatre d'entre eux : l'utilisation de la métrique du vide (transport à travers l'espace en altérant la géométrie de l'espace-temps), la téléportation quantique, l'utilisation d'univers parallèles, l'utilisation de la parapsychologie (psychokinèse et vision à distance). Le rapport élimine celle du type science-fiction, et reconnaît que, pour la téléportation d'êtres vivants, les quatre autres types évoqués sont pour le moins immatures pour ne pas dire embryonnaires et sans perspectives de succès évaluables même à long terme, ce qui n'obère pas, bien au contraire, la nécessité de recherches poussées dans ces domaines.

REFERENCES

- (1) M. Planck, *Über irreversible Strahlungsvorgänge*, Sitzungsberichte der Preußischen Akademie der Wissenschaften, Berlin pp. 440–480, 1899.
- (2) J.P. Nougier, “nanomonde, nanotechnologies”, Bull. Acad. Sc. Lett. Montpellier, **38**, 245-266 (2007).
- (3) A. Aspect et al., “Einstein aujourd’hui”, CNRS éditions, EDP Sciences, 2003.
- (4) A. Aspect, P. Grangier, and G. Roger, Phys. Rev. Lett., Vol. 49, Iss. 2, pp. 91–94 (1982).
- (5) A. Aspect, J. Dalibard and G. Roger, Phys. Rev. Lett., Vol. 49, Iss. 25, pp. 1804–1807 (1982).
- (6) 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).
- (7) M.D. Barrett *et al.*, “Deterministic quantum teleportation of atomic qubits”, Nature **429**, 737-739 (2004).
- (8) M. Riebe *et al.*, “Deterministic quantum teleportation with atoms”, Nature **429**, 734-737 (2004).
- (9) Juan Yin, Ji-Gang Ren, He Lu, Yuan Cao, Hai-Lin Yong, Yu-Ping Wu, Chang Liu, Sheng-Kai Liao, Fei Zhou, Yan Jiang, Xin-Dong Cai, Ping Xu, Ge-Sheng Pan, Jian-Jun Jia, Yong-Mei Huang, Hao Yin, Jian-Yu Wang, Yu-Ao Chen, Cheng-Zhi Peng & Jian-Wei Pan, *Quantum teleportation and entanglement distribution over 100-kilometre free-space channels*, Nature **488**, p. 185–188 (2012).
- (10) Xiao-song Ma, Thomas Herbst, Thomas Scheidl, Daqing Wang, Sebastian Kropatschek, William Naylor, Alexandra Mech, Bernhard Wittmann, Johannes Kofler, Elena Anisimova, Vadim Makarov, Thomas Jennewein, Rupert Ursin, Anton Zeilinger, *Quantum teleportation using active feed-forward between two Canary islands*, Nature **489**, p. 269 (2012).