

# Mécanique quantique

## Animations et interprétations philosophiques

Conférence par Daniel Fortier

Présentée chez les Sceptiques du Québec le 13 février 2007

### Introduction

La mécanique quantique est la science la plus mystérieuse. Elle traite du niveau le plus fondamental de la réalité, celui des particules (électrons, atomes, photons, ...) La mécanique quantique a fait entrer dans la physique des concepts radicalement nouveaux : dualité onde-corpuscule, superposition d'états, effet de l'observateur, probabilités, etc.

Par ailleurs, la mécanique quantique est un sujet favori pour ceux qui tiennent des discours irrationnels sur la réalité, qu'ils soient philosophes, gourous du Nouvel Âge ou même physiciens. Ainsi, la mécanique quantique nous révélerait une réalité indéfinie, indéterministe, contradictoire et subjective ; il existerait un lien profond entre la conscience et le niveau le plus ultime de la réalité, retour de l'humain au centre de l'univers.

Lors de la première partie (13 février 2007) de cette série de deux conférences, la théorie sera présentée de manière bien vulgarisée à l'aide d'animations créées par le conférencier. La seconde partie (13 septembre 2007) sera une discussion des différentes interprétations philosophiques de la mécanique quantique, les sensées et les extravagantes.

**Daniel Fortier** enseigne la physique au cégep Lionel-Groulx, où il a notamment créé son propre cours d'astrophysique. Il détient une maîtrise en astronomie de l'Université de Toronto et un baccalauréat en physique de l'Université de Montréal. En 2002, il a conçu et mis en ligne un site web sur la démarche scientifique : « Entre l'humain et la réalité. Comment distinguer le vrai du faux ? ».

<http://aladin.clg.qc.ca/~fortid01/>

## Première partie

Voici la première partie d'une série de deux conférences données par Daniel Fortier sur le sujet de la physique quantique. Dans cette première partie, Fortier décrira la différence entre la physique classique et la physique quantique. Il présentera le formalisme mathématique de cette dernière à l'aide d'animations informatiques qu'il a créées. Ces animations offrent une vision simplifiée de la réalité, car elles ne se déroulent qu'en une ou deux dimensions, alors que la théorie quantique décrit des phénomènes en trois dimensions. Le but de ces animations est de rendre visuelles et accessibles les idées fondamentales de la physique quantique. Ces animations sont incorporées dans le présent compte-rendu sous forme de bandes dessinées. Le conférencier

fera également la distinction entre science et philosophie et présentera deux interprétations philosophiques possibles du formalisme mathématique de la physique quantique, dont l'interprétation de Copenhague, qui est la mieux connue. D'autres interprétations philosophiques seront discutées lors de sa prochaine allocution en septembre 2007.

## **Structure de la conférence**

- 1) Un peu d'histoire
  - 2) Ondes et paquets d'ondes
  - 3) Science et philosophie
  - 4) La relation de Heisenberg
  - 5) L'expérience des fentes de Young
  - 6) Le postulat de réduction du paquet d'ondes
  - 7) Les systèmes quantiques et l'effet EPR
  - 8) La décohérence
  - 9) Le hasard en physique quantique
- À venir  
Période de questions

### **1) Un peu d'histoire**

#### **A) La physique classique**

##### **Le principe du tiers exclu expérimental**

La physique classique présente une vision dichotomique de la réalité, selon laquelle deux sortes d'entités existent : les corps matériels et les champs. La physique classique discute de deux types de champs : les champs gravitationnels et électromagnétiques. Les champs sont responsables des forces (gravitationnelles, électriques et magnétiques) entre les corps matériels.

Ces deux sortes d'entités, corps matériels et champs, se distinguent de manière radicale par trois caractéristiques. Les corps matériels sont (1) discontinus (ils ont une frontière séparant le dedans du dehors), (2) localisés (on peut leur attribuer une position, celle du point situé en leur centre) et (3) dénombrables. À l'opposé, les champs sont (1) continus (ils remplissent tout l'espace ; ils s'étalent jusqu'à l'infini), (2) délocalisés (parce qu'ils ont une extension infinie, on ne peut pas leur assigner une position dans l'espace) et (3) ne peuvent pas être dénombrés (ils se superposent les uns aux autres et se comportent alors comme un seul et unique champ total). Le principe du tiers exclu expérimental de la physique classique stipule que cette vision de la réalité est exhaustive : il n'existe pas de troisième sorte d'entité physique.

Ajoutons qu'un champ peut se propager sous forme d'onde : les ondes gravitationnelles et les ondes électromagnétiques. La lumière visible est un type particulier d'onde électromagnétique.

## **Les théories de la physique classique**

En physique classique, le mouvement des corps matériels est étudié par deux théories, la mécanique classique de Newton et la relativité restreinte d'Einstein. La mécanique classique est fondée sur quatre grands principes : les trois lois de Newton (la loi de l'inertie, la 2<sup>e</sup> loi de Newton selon laquelle la force totale exercée sur un corps est égale au produit de la masse et de l'accélération de ce corps, la loi d'action-réaction) et le principe de conservation de l'énergie. Les lois de la mécanique classique s'appliquent lorsque les vitesses des objets sont de beaucoup inférieures à la vitesse de la lumière. Sinon, on doit recourir à la théorie de la relativité restreinte d'Einstein, souvent considérée comme faisant partie de la physique classique, ici à titre de généralisation de la mécanique classique.

D'autre part, on peut nommer « théorie classique des champs » l'ensemble des théories de la physique classique qui étudient les champs gravitationnels et électromagnétiques. Les champs gravitationnels d'intensité faible à modérée sont représentés par la loi de la gravitation universelle de Newton. La théorie de la relativité générale d'Einstein est une théorie générale de la gravitation qui prend en charge toutes les intensités possibles des champs gravitationnels. Quant aux champs électromagnétiques, ils sont étudiés par l'électromagnétisme classique, l'optique classique ainsi que la relativité restreinte. L'optique appartient effectivement à l'étude des champs électromagnétiques parce que la lumière visible, comme nous l'avons déjà mentionné, est elle-même une onde électromagnétique, à l'instar des ondes radio, des micro-ondes, des infrarouges, des ultraviolets, des rayons X et des rayons gamma.

## **Particules et corpuscules**

Le conférencier a voulu établir une distinction claire entre deux termes souvent utilisés comme synonymes. Il emploiera le terme « particule » pour désigner les plus petits objets de la réalité physique, comme les électrons. Le terme « corpuscule » sera employé comme synonyme de « petite bille dure » et se rapportera à la nature des particules. La physique classique conçoit les particules comme des corpuscules : cette conception sera remise en question par la physique quantique.

## **B) De la physique classique à la physique quantique**

Au début du 20<sup>e</sup> siècle, alors qu'il devient possible de faire des expériences à l'échelle microscopique, on découvre certaines situations où la physique classique ne s'applique pas. Par exemple, pour expliquer le rayonnement particulier des corps noirs, Planck doit rejeter, en 1900, l'idée que la lumière est un phénomène continu et émettre l'hypothèse qu'elle est émise en quanta, ou paquets, d'énergie. Cette même discrétisation de l'énergie est nécessaire, comme le découvre Einstein en 1905, pour expliquer l'effet photoélectrique. Tout cela mène Einstein à postuler, en 1912, la dualité onde-corpuscule : la lumière serait une onde, mais composée de corpuscules, que l'on nomme photons.

Bohr présente par la suite, en 1913, un nouveau modèle de l'atome dans lequel il y a une discontinuité entre les niveaux d'énergie possibles pour les électrons. Ainsi, les électrons dans un

atome ne peuvent circuler que sur certaines orbites bien précises autour du noyau. Ils ne peuvent jamais se trouver entre deux orbites permises. Les électrons passent d'une orbite à l'autre par ce que l'on nomme un saut quantique.

En 1924, Louis de Broglie va plus loin que l'idée de Planck et d'Einstein selon laquelle les ondes lumineuses sont composées de corpuscules. Il propose que la matière elle-même possède une dualité onde-corpuscule (c'est-à-dire une dualité onde-petite bille dure) : il associe des ondes aux corpuscules de matière. Cette idée sera confirmée en 1927 par une expérience de diffraction d'électrons, la diffraction étant un phénomène ondulatoire qui fut ici observé chez des particules de matière, et sur lequel le conférencier reviendra plus tard.

Alors qu'en physique classique, la position et la vitesse d'un corps matériel fournissent une description complète de son état (si la masse et la charge électrique sont connues), les découvertes à l'échelle microscopique de la réalité demandent que l'on fasse appel à un nouveau type d'état, le spin. Le spin est une grandeur physique abstraite qui n'a aucun équivalent en physique classique. La seule manière dont on peut le visualiser est en recourant à une analogie erronée, selon laquelle le spin représenterait la rotation d'une particule sur elle-même.

### **C) La physique quantique depuis 1925**

La physique quantique est un domaine qui regroupe cinq théories et quatre formalismes mathématiques équivalents.

Une première théorie quantique véritable est présentée en 1925 par Heisenberg : la mécanique des matrices (une matrice étant un objet mathématique). L'année suivante, Schrödinger propose une seconde théorie, la mécanique ondulatoire, fondée sur le concept de paquet d'ondes ainsi que sur le calcul différentiel et intégral. Schrödinger montre ensuite l'équivalence entre sa théorie et celle de Heisenberg. En 1927, c'est au tour de Dirac d'entrer en scène avec son formalisme mathématique des vecteurs d'états. Il démontre que son formalisme des vecteurs d'états est non seulement équivalent au formalisme des matrices de Heisenberg et à celui des fonctions d'onde de Schrödinger, mais qu'il est plus général.

Ces trois premières théories, que l'on peut désigner collectivement par l'expression « mécanique quantique non relativiste » (car elles ne sont valides que pour des particules se déplaçant à des vitesses très inférieures à celle de la lumière), ou encore « mécanique quantique » tout court, sont différentes, mais équivalentes.

Dans un désir de développer une physique unifiée, on cherche une mécanique quantique qui soit compatible avec les deux théories de la relativité, restreinte et générale. En 1928, Dirac réussit à unifier sa mécanique des vecteurs d'états avec la relativité restreinte. La mécanique quantique relativiste de Dirac a une application très limitée. Elle a cependant un grand mérite : alors que le spin est une grandeur physique qui doit être incorporée aux trois premières théories par un postulat supplémentaire, il devient une conséquence naturelle de la mécanique quantique relativiste de Dirac. De plus, Dirac prédit en 1930, à partir de sa mécanique quantique relativiste, l'existence de l'antimatière. Les antiparticules seraient des « trous » dans les états d'énergie négative des particules ordinaires, c'est-à-dire des états inoccupés. Dirac dira même que

l'antiélectron, devant avoir une charge positive, et le proton constituent une seule et même particule. En 1931, Dirac modifie sa prédiction : les antiparticules seraient des particules totalement nouvelles. Les antiélectrons seraient des électrons de charge positive, mais non des protons. Cette seconde conception de l'antimatière est celle qui est aujourd'hui en vigueur. La prédiction corrigée de Dirac sera confirmée expérimentalement par Carl Anderson en 1932-1933 : Anderson découvre, dans le rayonnement cosmique, des traces laissées par des électrons positifs, qu'il nomme positrons.

La recherche d'une théorie satisfaisante qui unifie mécanique quantique et relativité se poursuit. En 1948, une nouvelle théorie voit le jour : la théorie quantique des champs. Elle unifie mécanique quantique et relativité restreinte et ne souffre pas des limites de la mécanique quantique relativiste de Dirac. Elle s'énonce dans un nouveau formalisme mathématique, celui des intégrales de chemin de Feynman. La théorie quantique des champs continue de se développer depuis 1948 et discute aujourd'hui des quatre forces fondamentales qui régissent tous les phénomènes physiques connus, soit la force gravitationnelle, la force électromagnétique et les forces nucléaires faible et forte. Notons que ces deux dernières forces ne se manifestent qu'à l'échelle des noyaux atomiques ; mis à part les phénomènes de la physique nucléaire, tous les phénomènes physiques connus sont régis par les forces gravitationnelle et électromagnétique. Chacune de ces quatre forces est engendrée par son propre champ. Notons qu'à ce jour, seulement trois des quatre champs sont quantifiés par cette théorie, c'est-à-dire décrits, dans un formalisme mathématique cohérent et concordant avec les faits, comme étant composés de particules. Le seul qui fait exception est le champ gravitationnel : la théorie quantique des champs n'a pas encore réussi à en produire une description quantifiée cohérente et concordante. La théorie quantique des champs, que l'on désigne aussi par l'expression physique des particules, est la théorie physique la plus générale aujourd'hui. Elle est toujours l'objet de recherches.

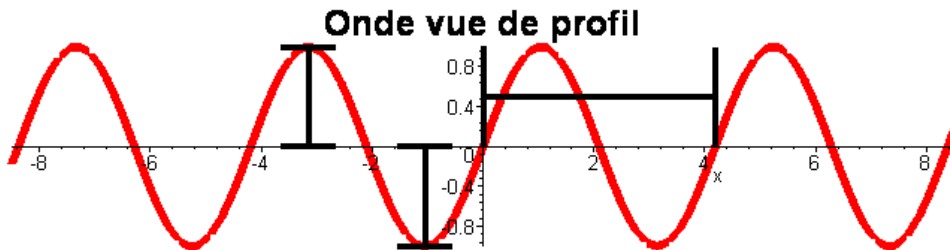
Les physiciens sont notamment à la recherche de la « théorie du tout », qui permettrait de véritablement incorporer la gravitation à la théorie quantique des champs. Or, la théorie de la gravitation la plus générale dont disposent les physiciens aujourd'hui est la relativité générale. La « quête du Saint-Graal » de la physique d'aujourd'hui est ainsi de tenter d'unifier la théorie quantique des champs et la relativité générale en une seule et unique « théorie du tout ». Des solutions potentielles comprennent la théorie des cordes, la théorie des membranes et la théorie de la gravitation quantique.

## **2) Ondes et paquets d'ondes**

Daniel Fortier décide de nous présenter le formalisme des fonctions d'onde de Schrödinger, parce que c'est le moins abstrait et le plus intuitif des quatre formalismes équivalents de la physique quantique. À la base de ce formalisme se trouvent les notions d'ondes et de paquets d'ondes.

### **A) Amplitude, longueur d'onde et front d'onde**

Vue de profil, une onde est un cycle qui se répète à l'infini, alternant entre crête et creux. On définit une onde par son amplitude, soit la hauteur d'une crête ou la profondeur d'un creux, et sa longueur d'onde, la longueur d'un cycle. Par cycle, on entend un creux et une crête.

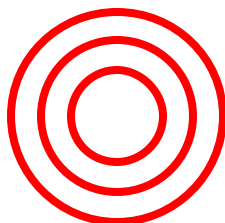


On peut regarder la même onde en se plaçant au-dessus.



Les sommets des crêtes sont alors représentés par les traits, dessinés dans le sens de la largeur de l'onde (donc, pourrait-on dire, dans le sens « gauche-droite », perpendiculaire à la fois à la longueur d'onde, qui est alors le sens « avant-arrière », et à l'amplitude, qui est alors le sens « haut-bas »), que l'on nomme fronts d'onde. Entre deux fronts d'onde, on retrouve tous les points intermédiaires de l'onde. Ainsi, les fonds des creux se situent tous à mi-chemin entre deux fronts d'onde.

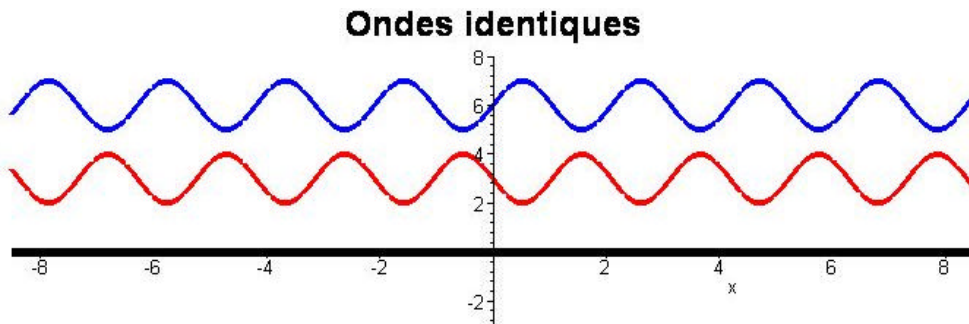
On distingue, selon la forme des fronts d'onde, deux types d'ondes : les ondes planes, dont les fronts d'onde sont des plans (sont rectilignes), comme dans la figure ci-haut, et les ondes circulaires, dont les fronts d'onde sont des arcs de cercle, comme les ondes que l'on crée à la surface de l'eau en tapant du doigt, tel qu'illustré sur la figure ci-dessous.



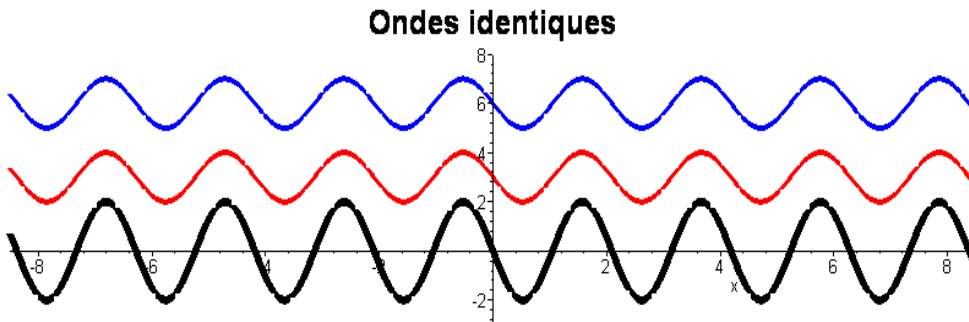
## B) Superposition d'ondes ; interférence constructive et destructive

On dit de deux ondes qui se rencontrent qu'elles se superposent. L'onde résultante est tout simplement la somme des deux ondes.

Regardons d'abord la superposition de deux ondes identiques. Si les crêtes d'une onde coïncident avec les creux de l'autre, le résultat est nul. Ce phénomène se nomme interférence destructive.

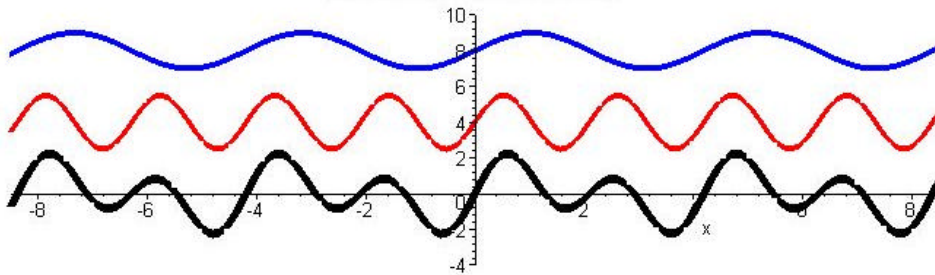


Par ailleurs, si les crêtes d'une onde coïncident avec les crêtes de l'autre, l'onde unique qui résulte de cette superposition a une amplitude deux fois plus grande. Ce phénomène se nomme interférence constructive.



Si ce sont des ondes différentes qui se superposent, ayant des amplitudes et/ou longueurs d'onde différentes, les interférences constructives et destructives qui auront lieu ne seront pas totales.

## Ondes différentes

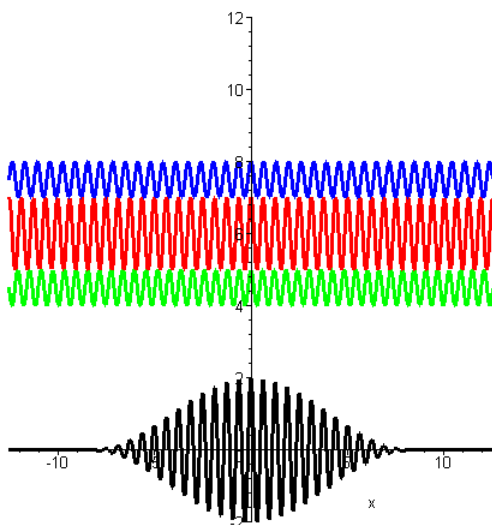


Le sillon d'un disque de vinyle, par exemple, est une succession de crêtes et de creux qui représente l'onde unique qui résulte de la superposition de toutes les ondes émises par tous les instruments. Les haut-parleurs émettent ainsi une onde sonore unique, l'onde résultante, et ce sont nos oreilles et notre cerveau qui, par la suite, décomposent cette onde résultante unique en différents instruments.

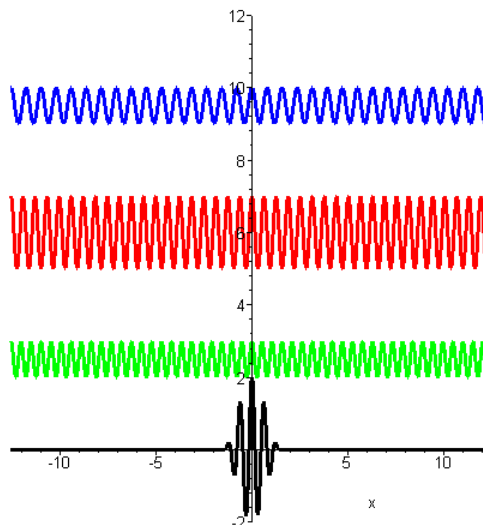
### C) Les paquets d'ondes

L'idée de de Broglie, en 1924, d'associer une onde à chaque corpuscule de matière implique que la position du corpuscule doit correspondre à la position de l'onde. Or, une onde est un cycle qui se répète à l'infini : une onde s'étale sur une distance infinie ! Faudrait-il en conclure qu'une particule de matière occupe ainsi tout l'univers ? Cela ne serait pas un modèle très satisfaisant ! Pour régler ce problème, on superpose *plusieurs* ondes afin de construire un paquet d'ondes. En superposant en réalité une infinité d'ondes, on obtient un objet de taille finie (et non infinie), le paquet d'ondes, qui peut ainsi représenter une particule. Le conférencier a présenté des animations simplifiées dans lesquelles il ne superposait que trois ondes pour construire ses paquets d'ondes.

Ondes de de Broglie et paquet d'ondes



Ondes de de Broglie et paquet d'ondes





## La relation de Louis de Broglie

Qu'en est-il alors de la vitesse d'une particule représentée par un paquet d'ondes ? Louis de Broglie, en associant des ondes aux particules de matière, a énoncé une relation entre la vitesse de la particule et la longueur de l'onde :

$$v \propto \frac{1}{L}$$

où  $\propto$  est le symbole de proportionnalité,  $v$  est la vitesse de la particule et  $L$  la longueur de l'onde.

Ainsi, une onde courte représente une grande vitesse pour la particule (exemple : l'onde verte), alors qu'une onde longue représente une petite vitesse (exemple : l'onde bleue).

## D) Les superpositions d'états

Dans un paquet d'ondes, il y a une infinité de longueurs d'onde différentes, et donc une infinité de vitesses. Cela signifie-t-il que le fait de représenter une particule par un paquet d'ondes implique qu'une particule possède plusieurs vitesses simultanément ? C'est exact ! C'est le concept de superposition d'états, qui est central à la mécanique quantique. Ce concept se généralise ensuite à toutes les grandeurs physiques : une particule possède simultanément plusieurs positions, plusieurs spins, plusieurs énergies, etc. !

La superposition d'états pour la position est représentée par le paquet d'ondes lui-même. Chaque « état position » est un point dans l'espace. Les points d'espace contenus à l'intérieur du paquet d'ondes représentent l'ensemble des positions qu'une particule possède simultanément à un instant donné. Quant à la superposition de vitesses, elle a pour conséquence qu'un paquet d'ondes qui se propage librement, sans interagir avec aucun élément de son environnement, s'étale – gonfle – en se propageant. Et ce, à l'instar d'un peloton de marathoniens. Les différents coureurs ont des vitesses différentes. Avec le temps, le coureur le plus rapide prend de plus en plus d'avance sur le coureur le plus lent, de sorte qu'avec le temps, le peloton s'étale.

## 3) Science et philosophie

Tout ce qui vient d'être présenté ici relève de la science, c'est-à-dire du formalisme mathématique de la physique quantique, plus spécifiquement du formalisme de Schrödinger (1926). Tout ce qui vient d'être présenté ici a donc été confronté à et confirmé par des expériences reproductibles. Mais le formalisme mathématique de la physique quantique, bien qu'il nous permette de calculer correctement ce que seront les résultats d'expériences, ne nous dit pas comment interpréter les objets mathématiques employés pour effectuer ces calculs (dans le cas du formalisme de Schrödinger, les paquets d'ondes), quelle signification leur donner. Bref : le formalisme mathématique ne nous dit pas à quoi ressemble la réalité à l'échelle microscopique.

La curiosité humaine étant sans limites, le pas allant du domaine de la science à celui de la philosophie fut rapidement franchi. Différentes interprétations philosophiques du formalisme mathématique de la physique quantique existent et tentent de comprendre la signification de

celui-ci, donc la nature de la réalité à l'échelle quantique. Une mise en garde doit être donnée avant d'aborder les interprétations philosophiques : puisqu'elles ne font pas partie du domaine de la science, elles ne sont pas confrontées à la réalité par des expériences dans le but d'être confirmées ou infirmées. Elles peuvent être passionnantes, mais ne sont que des discours théoriques.

Dans la première partie de sa conférence, Fortier n'en présentera que deux : l'interprétation de Copenhague et une interprétation littérale, « naïve ». Il discutera des principales autres interprétations philosophiques de la physique quantique lors de la deuxième partie de sa conférence, tout en revenant sur les interprétations de Copenhague et naïve.

## A) L'interprétation de Copenhague

L'interprétation de Copenhague est la première interprétation philosophique de la physique quantique à avoir été formulée, entre 1927 et 1932. Elle est principalement due à quatre physiciens, tous des fondateurs de la physique quantique : Niels Bohr, Werner Heisenberg, Max Born et John von Neumann. Selon ce point de vue, le paquet d'ondes, qui représente une particule, ne correspond pas à la réalité physique, mais à la connaissance que nous en avons. Selon l'interprétation de Copenhague, une particule n'est ni une onde ni un corpuscule (une petite bille dure), mais quelque chose que nous sommes incapables de décrire, sinon en nous référant à ces deux modèles mutuellement exclusifs, mais conjointement nécessaires afin de rendre compte de toutes les situations expérimentales. C'est le principe de complémentarité : l'onde et le corpuscule sont des descriptions dites complémentaires. Le paquet d'ondes n'est donc pas une représentation littérale de la réalité ; il n'est rien de plus qu'un outil de calcul. L'interprétation de Copenhague peut être qualifiée « d'interprétation épistémologique » de la physique quantique. Le terme « épistémologie » signifie, étymologiquement, « discours sur la connaissance ». L'épistémologie désigne « ce que les humains peuvent connaître de la réalité », plus précisément : (1) comment les humains font pour découvrir de nouvelles idées sur la réalité, (2) comment les humains font pour distinguer le vrai du faux, et enfin (3) quelles sont les limites à ce que les humains peuvent connaître de la réalité.

Pourquoi alors représenter une particule par un paquet d'ondes ? L'interprétation de Copenhague répond en affirmant que la réalité quantique, lorsque non observée, est floue, brouillée, indéfinie. Le paquet d'ondes, étant à la fois une superposition de positions (tous les points d'espace situés à l'intérieur du paquet d'ondes) et une superposition de vitesses (représentée par les ondes de de Broglie qui, en se superposant, construisent le paquet d'ondes), représente notre connaissance d'une réalité intrinsèquement indéfinie. L'interprétation de Copenhague voit les superpositions d'états comme des ensembles de possibilités. Elle voit les largeurs des superpositions d'états,  $\Delta x$  et  $\Delta v$ , comme des incertitudes intrinsèques (appartenant aux particules elles-mêmes, et non aux instruments de mesure) sur les grandeurs physiques position et vitesse.

Selon l'interprétation de Copenhague, une particule non observée n'a pas de position précise, mais un ensemble de possibilités représenté par le paquet d'ondes (par la superposition d'états de position). Le paquet d'ondes représente la position uniquement du point situé au centre de la particule, et non la particule dans son ensemble. Le centre de la particule se situe simultanément partout dans le paquet d'ondes : la particule est dite délocalisée. De même, selon l'interprétation

de Copenhague, une particule n'a pas de vitesse précise, mais un ensemble de possibilités représenté par le spectre de vitesses (le spectre des ondes de de Broglie, ou encore la superposition d'états de vitesse). Le fait que le paquet d'ondes gonfle en se propageant librement signifie qu'avec le temps, la position de la particule devient de plus en plus floue, ce qui se comprend étant donné que la vitesse à laquelle la particule se déplace est elle-même floue. Et ce, contrairement aux corps matériels macroscopiques de la physique classique, dont le point situé au centre possède en tout temps une position et une vitesse bien définies.

L'interprétation de Copenhague demeure, en ce début de 21<sup>e</sup> siècle, l'interprétation la plus populaire de la physique quantique, chez les philosophes, les vulgarisateurs scientifiques et les physiciens ex-mêmes. Malheureusement, toutes ces personnes ont la fâcheuse tendance à confondre l'interprétation de Copenhague, qui relève de la philosophie, avec la physique quantique elle-même, qui relève de la science. Ainsi, on peut entendre que «selon la physique quantique, la réalité microscopique est intrinsèquement floue». Ce n'est pas la physique quantique qui dit cela, mais l'interprétation de Copenhague. Tout ce que la physique quantique dit, c'est que les grandeurs physiques, comme la position et la vitesse, se font attribuer des superpositions d'états plutôt que des valeurs numériques uniques. Là s'arrête la science. Là commence la philosophie. Rappelons que seule la science est confirmée par l'expérience, la philosophie relevant uniquement du discours théorique.

## **B) Une interprétation naïve**

D'ailleurs, il existe plus d'une manière d'interpréter le formalisme mathématique de la physique quantique. Fortier préfère à l'interprétation de Copenhague une interprétation littérale de la physique quantique : il prend le formalisme mathématique au pied de la lettre. Si le formalisme mathématique représente les particules par des paquets d'ondes, cela signifie directement que, dans la réalité, les particules sont effectivement des paquets d'ondes – jamais des corpuscules (petites billes dures). Le paquet d'ondes est donc une représentation littérale de la réalité ; par conséquent, il est aussi automatiquement un outil de calcul. D'un point de vue philosophique, interpréter littéralement le formalisme mathématique de la physique quantique peut être vu comme de la naïveté. Pour le conférencier, une interprétation «naïve» de la physique quantique est la seule qui soit sensée !

L'interprétation naïve peut être qualifiée «d'interprétation ontologique» de la physique quantique. Le terme «ontologie» signifie, étymologiquement, «discours sur l'être». En philosophie, «l'être» signifie «ce qui est», c'est-à-dire «ce qui existe». On aurait pu dire que le terme ontologie signifie «discours sur l'existant». L'ontologie représente ainsi toutes les idées que les humains ont sur «ce que la réalité est et fait», notamment les théories scientifiques. Ontologie est donc synonyme de «conception de la réalité».

Quelle signification une interprétation naïve de la physique quantique donnera-t-elle aux superpositions d'états ? La superposition de positions, c'est-à-dire le paquet d'ondes lui-même, représentera la particule dans son ensemble, donc sa taille et sa forme, et non uniquement la position du point situé en son centre. Si une particule est effectivement un paquet d'ondes, cela signifie que ses frontières sont floues et que sa forme et son volume sont variables, contrairement au cas d'un corpuscule (petite bille dure). Cependant, selon ce point de vue, la position de la

particule ne sera pas floue, mais sera au contraire clairement définie comme étant la position du point situé au centre du paquet d'ondes (de manière plus rigoureuse : comme étant la valeur moyenne de la superposition d'états de la position – comme étant la position moyenne). Selon l'interprétation naïve, les particules sont donc localisées, tout comme les corps matériels de la physique classique, et ce, contrairement à ce que dit l'interprétation de Copenhague.

Selon l'interprétation naïve, la superposition d'états de la vitesse signifiera que la particule (dont la taille et la forme, variables, sont représentées par le paquet d'ondes) gonfle, grossit, littéralement, lorsqu'elle se propage librement, lorsqu'il y a absence d'interaction avec son environnement. Cela n'implique aucunement que la position de la particule devienne floue avec le temps, puisque la position demeure en tout temps définie comme étant la position du point au centre du paquet d'ondes. De plus, l'interprétation naïve permet d'attribuer une vitesse unique et bien définie à la particule : cette vitesse sera clairement définie en tant que valeur moyenne de la superposition d'états de la vitesse – en tant que vitesse moyenne. Autrement dit, selon l'interprétation naïve, la superposition d'états de vitesse signifie que la particule grossit en se propageant, et la vitesse moyenne est la vitesse à laquelle le point situé au centre de la particule se déplace.

Et c'est tout : selon l'interprétation naïve, il n'y a rien de plus profond à déduire du concept de superposition d'états.

### **Critique de l'interprétation de Copenhague**

Fortier affirme que l'interprétation de Copenhague de la physique quantique, malgré ses origines « nobles » et sa popularité, est erronée, et ce, parce qu'elle tente de donner une signification au formalisme mathématique de la physique quantique en maintenant implicitement deux concepts classiques, celui de corpuscule (petite bille dure ; principe de complémentarité : dualité onde-corpuscule) et celui d'état unique (en physique classique, la position et la vitesse d'un corps matériel ont des valeurs numériques uniques en tout temps). Or, selon la physique quantique, les grandeurs physiques, comme la position et la vitesse, se font assigner des superpositions d'états (plusieurs valeurs numériques simultanément).

C'est en tentant implicitement de concilier, d'une part, les concepts classiques de corpuscule et d'état unique, et, d'autre part, le concept quantique de superposition d'états, que l'interprétation de Copenhague conclut que la position et la vitesse (du point situé au centre) d'une particule non observée ont chacune une valeur numérique unique, mais intrinsèquement floue, indéfinie. Les superpositions d'états sont interprétées comme des ensembles de possibilités et leurs largeurs,  $\Delta x$  et  $\Delta v$ , comme des incertitudes intrinsèques.

Or, les concepts de corpuscule, d'état unique, d'état unique flou, d'ensemble de possibilités et d'incertitude intrinsèque n'existent tout simplement pas dans le formalisme mathématique de la physique quantique : ce dernier ne parle que de superposition d'états. Ces concepts n'existent que dans l'interprétation de Copenhague.

Parce que l'interprétation de Copenhague se fonde implicitement sur les concepts classiques de corpuscule et d'état unique, Fortier la qualifie de semi-classique, ou, de manière équivalente, de semi-quantique.

### **L'interprétation naïve : véritablement et entièrement quantique**

L'interprétation naïve proposée par Fortier se veut une interprétation philosophique véritablement et entièrement quantique. L'interprétation naïve rejette dès le départ les concepts classiques de corpuscule et d'état unique pour l'échelle microscopique de la réalité (mais non pour l'échelle macroscopique, soit celle de la physique classique). Elle refuse ainsi de se fonder, implicitement ou explicitement, sur des concepts qui n'existent pas dans le formalisme mathématique de la physique quantique, mais qui n'existent que dans la tête de la personne qui tente d'interpréter ce formalisme, et ce, parce que l'esprit de cette personne est habitué à penser la réalité physique selon la manière dont celle-ci se manifeste à l'échelle humaine, macroscopique.

L'interprétation naïve prend le concept de superposition d'états au pied de la lettre. Selon l'interprétation naïve, les grandeurs physiques, comme la position et la vitesse, n'ont pas des valeurs numériques uniques, mais intrinsèquement indéfinies : elles possèdent littéralement plusieurs valeurs numériques simultanément, qui toutes sont bien définies. Selon l'interprétation naïve, la réalité à l'échelle microscopique n'est pas floue : elle est définie de manière aussi précise que la réalité à l'échelle macroscopique. Les particules ne sont pas des entités ayant une position et une vitesse intrinsèquement floues, se comportant tantôt comme des ondes et tantôt comme des corpuscules, mais sont, littéralement, des paquets d'ondes, dont le point situé au centre possède une position et une vitesse bien définies en tout temps, à l'instar des corps matériels macroscopiques de la physique classique. Cependant, puisque les particules sont, littéralement, des paquets d'ondes, leur comportement n'est pas identique à celui des corps matériels macroscopiques. Le comportement des particules microscopiques est un hybride entre le comportement des corps matériels macroscopiques et celui des ondes macroscopiques. Et même mieux : il existe dans le formalisme mathématique de la physique quantique un théorème, le théorème d'Ehrenfest, démontré en 1927, selon lequel le point situé au centre d'un paquet d'ondes obéit à la 2<sup>e</sup> loi de Newton de la physique classique (force totale = masse x accélération), loi qui s'applique d'abord aux corps matériels macroscopiques. Ainsi, dans les situations particulières où un paquet d'ondes (qui est, littéralement, la particule) évolue dans un environnement dont les dimensions sont beaucoup plus grandes que sa propre taille, il est tout à fait légitime de le traiter comme un corpuscule classique.

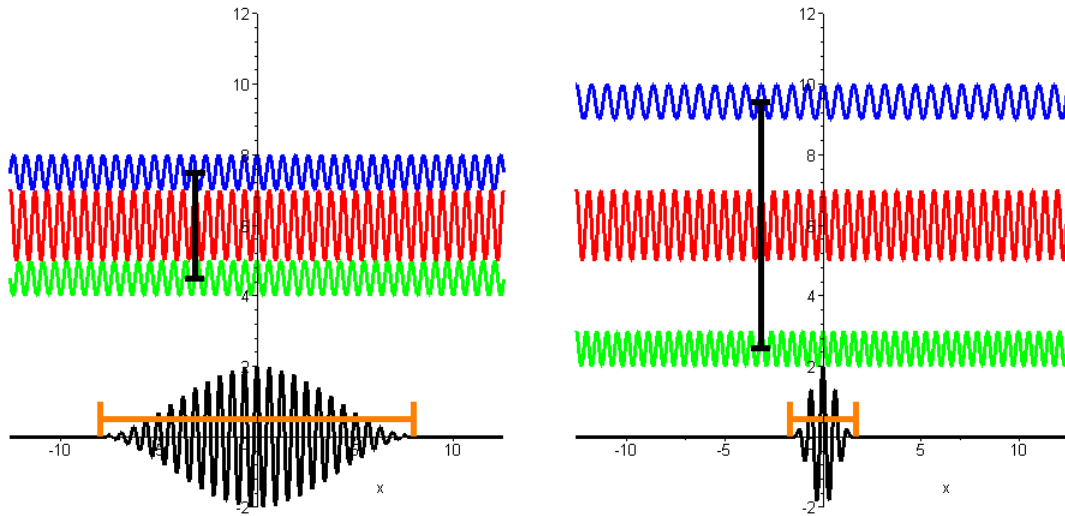
## **4) La relation de Heisenberg**

Selon la relation de de Broglie, chacune des ondes, qui se superposent pour construire un paquet d'ondes, est associée à une vitesse :

$$v \propto \frac{1}{L}$$

L'ensemble de ces ondes représente donc un « spectre de vitesses », soit l'ensemble des vitesses que possède simultanément la particule représentée par ce paquet d'ondes. Les lois mathématiques qui régissent les paquets d'ondes (et que l'on nomme « transformées de Fourier ») impliquent une « relation de réciprocity inverse » entre le spectre de vitesses et le paquet d'ondes : plus le spectre de vitesses est étroit (autrement dit : plus la différence entre les longueurs d'onde des ondes verte et bleue est petite) et plus le paquet d'ondes est large ; à l'inverse, plus le spectre de vitesses est large (autrement dit : plus la différence entre les longueurs d'onde des ondes verte et bleue est grande) et plus le paquet d'ondes est étroit.

**Ondes de de Broglie et paquet d'ondes Ondes de de Broglie et paquet d'ondes**



Nommons «  $\Delta v$  » ( $\Delta$ = lettre grecque « delta » majuscule) la largeur du spectre de vitesses :  $\Delta v = v_{\max} (1/L \text{ de l'onde verte}) - v_{\min} (1/L \text{ de l'onde bleue})$ . Nommons «  $\Delta x$  » la largeur du paquet d'ondes. Ce que l'on nomme « relation de Heisenberg » en physique quantique est précisément cette relation de réciprocity inverse, inhérente au concept de paquet d'ondes :

$$\Delta x \Delta v \geq \text{valeur minimale}$$

En fait, la véritable relation de Heisenberg s'énonce ainsi :

$$\Delta x \Delta p \geq \frac{h}{4\pi}$$

où  $p$  est la quantité de mouvement ( $p = mv$ , le produit de la masse et de la vitesse) et  $h$  la constante de Planck.

La relation de Heisenberg est une propriété intrinsèque aux paquets d'ondes, donc aux particules elles-mêmes. Elle n'est pas liée à l'imperfection des instruments de mesure, donc ne représente pas une incapacité de l'observateur de mesurer de manière exacte la position et/ou la vitesse d'une particule

## Interprétations philosophiques de la relation de Heisenberg

Selon l'interprétation de Copenhague, la relation de Heisenberg signifie que les grandeurs physiques position et vitesse sont incompatibles : mieux l'une est définie (plus sa superposition d'états est étroite) et plus l'autre est floue (plus sa superposition d'états est large).

Selon l'interprétation naïve, les grandeurs physiques position et vitesse sont entièrement compatibles : la relation de Heisenberg est vue ici simplement comme une relation d'interdépendance entre leurs superpositions d'états, plus précisément comme une relation de réciprocité inverse entre la largeur du paquet d'ondes et la largeur du spectre de vitesses. Cette relation est inhérente au concept même de paquet d'ondes. Encore une fois, dire qu'une particule est littéralement un paquet d'ondes implique que ses frontières sont floues (mais non la position et la vitesse du point situé au centre du paquet d'ondes !) et que sa taille et sa forme sont variables. Lorsque la taille d'une particule est petite (paquet d'ondes étroit), il s'ensuit que, en raison de cette relation de réciprocité inverse inhérente aux paquets d'ondes, son spectre de vitesses est large. À l'inverse, lorsque le spectre de vitesses d'une particule est étroit, il s'ensuit que sa taille est grande (paquet d'ondes large). Et c'est tout : selon l'interprétation naïve, il n'y a rien de plus profond à déduire de la relation de Heisenberg.

On emploie souvent les expressions «relation d'incertitude » ou «relation d'indétermination » pour désigner la relation de Heisenberg. On dit alors que plus la position ou la vitesse d'une particule est définie avec précision et plus l'autre grandeur est incertaine ou indéfinie. Ces expressions ne traduisent pas la réalité du formalisme mathématique de la physique quantique, mais celle de l'interprétation de Copenhague. Dans le formalisme mathématique, les termes  $\Delta x$  et  $\Delta v$  qui apparaissent dans la relation de Heisenberg désignent respectivement la largeur du paquet d'ondes et la largeur du spectre de vitesses. C'est l'interprétation de Copenhague qui interprète les termes  $\Delta x$  et  $\Delta v$  comme des « incertitudes intrinsèques » sur la position et la vitesse, et ce, parce qu'elle considère que ces grandeurs physiques ont des valeurs numériques uniques mais intrinsèquement floues.

Ainsi, les concepts d'incertitude, d'indétermination ou d'indéfinition, dont parle l'interprétation de Copenhague, n'existent tout simplement pas dans le formalisme mathématique. Les expressions « relation d'incertitude » et « relation d'indétermination » ne sont donc pas scientifiques, mais uniquement philosophiques. C'est pourquoi le conférencier emploie uniquement l'expression « relation de Heisenberg », qui, elle, est véritablement scientifique.

Certains parlent parfois même de « principe d'incertitude », comme si l'incertitude était une idée essentielle faisant partie des fondements mêmes de la physique quantique. Or, il n'en est rien : aucun principe de ce genre n'existe en physique quantique. Ce qui existe dans le formalisme mathématique de la physique quantique n'est pas un *principe*, mais une *relation*, mathématique, entre la largeur du paquet d'ondes et la largeur de son spectre de vitesses. De plus, encore une fois, rien dans le formalisme mathématique n'associe cette relation aux concepts d'incertitude, d'indétermination ou d'indéfinition. Encore une fois, ces concepts n'existent tout simplement pas dans le formalisme mathématique ! C'est l'interprétation de Copenhague qui, en tentant implicitement de concilier les concepts classiques de corpuscule et d'état unique avec, ici, les

concepts quantiques de superposition d'états et de relation de Heisenberg, fait apparaître artificiellement ce concept d'incertitude.

À nouveau, Fortier affirme que l'interprétation de Copenhague est erronée, parce qu'elle se fonde implicitement sur deux concepts classiques, ceux de corpuscule et d'état unique, qui n'existent tout simplement pas dans le formalisme mathématique de la physique quantique. À nouveau, le conférencier affirme que l'interprétation de Copenhague est semi-classique, ou semi-quantique, et que seule l'interprétation naïve est véritablement et entièrement quantique.

## **5) L'expérience des fentes de Young**

L'expérience des fentes de Young est une expérience qui met en évidence de façon marquante, d'une part les propriétés différentes des ondes et des corpuscules selon la physique classique, et, d'autre part, la dualité onde-corpuscule de la physique quantique.

### **A) Version classique**

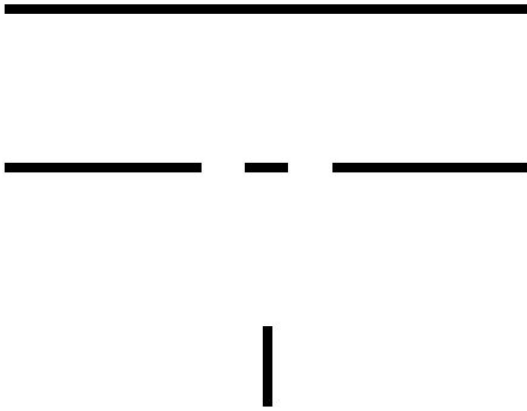
#### **Corps matériels classiques**

Considérons tout d'abord la situation classique. Pour étudier le comportement des corpuscules macroscopiques, on lance des balles à partir d'un canon vers un écran et on enregistre les points d'impact que font ces balles sur l'écran. Entre le canon et l'écran, il y a un mur, dans lequel deux fentes sont percées. Sans grande surprise, l'expérience révèle que les balles ne passent que par les fentes dans ce mur. Le dessin qui sera constitué, sur l'écran, de l'ensemble des points d'impact des balles, formera deux taches rectangulaires vis-à-vis les fentes du mur. S'il n'y avait eu qu'une seule fente dans le mur, on aurait obtenu sur l'écran le dessin d'une seule tache rectangulaire vis-à-vis cette fente.

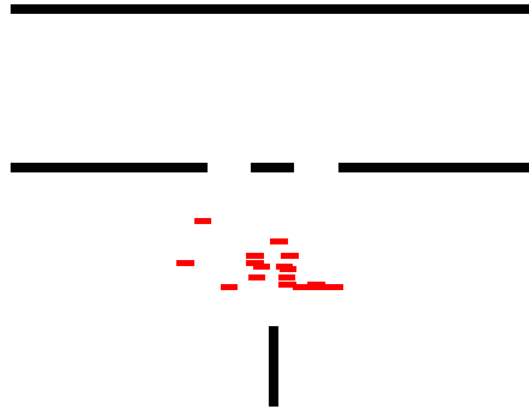
#### **Balles classiques et deux fentes ouvertes (vue de haut et vue de l'écran)**



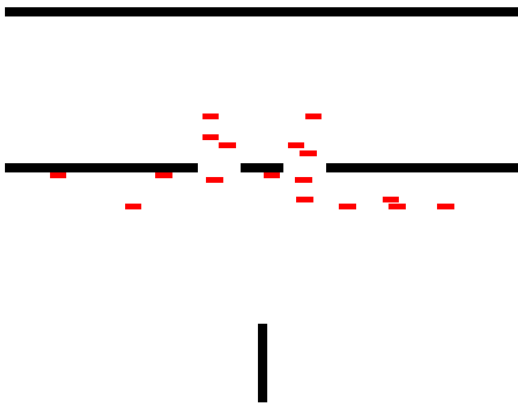
**Corpuscules et 2 fentes**



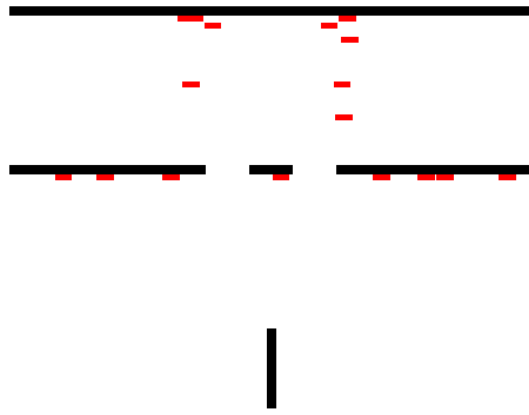
**Corpuscules et 2 fentes**



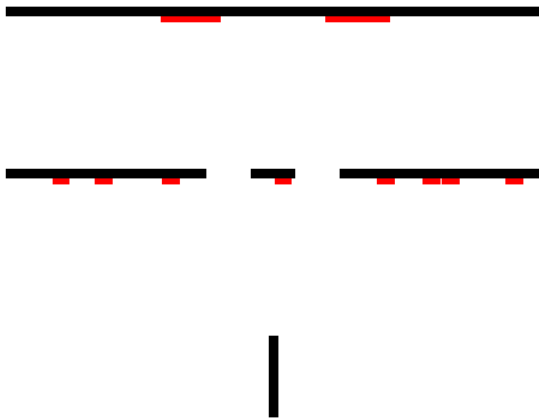
**Corpuscules et 2 fentes**



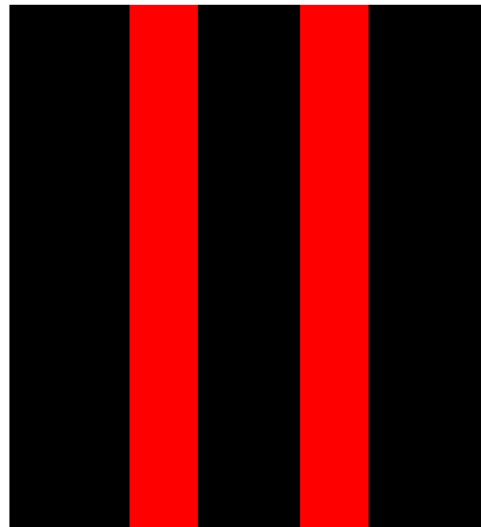
**Corpuscules et 2 fentes**



**Corpuscules et 2 fentes**

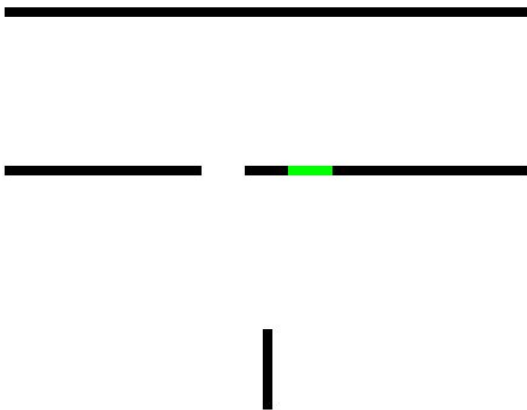


**2 fentes**

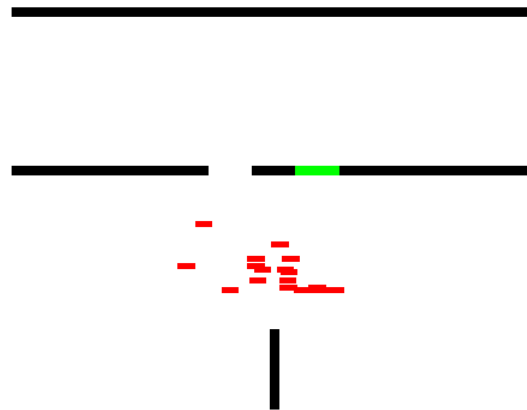


**Balles classiques et une fente ouverte (gauche ; vue de haut et vue de l'écran)**

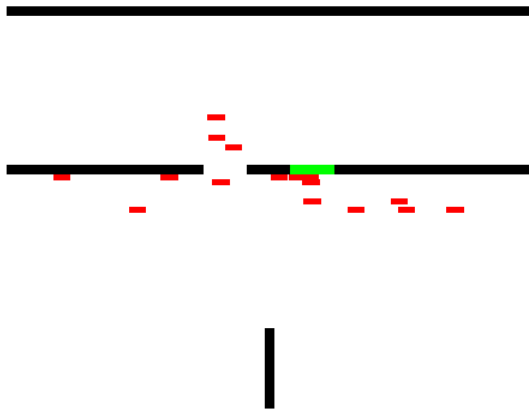
**Corpuscules et 1 fente**



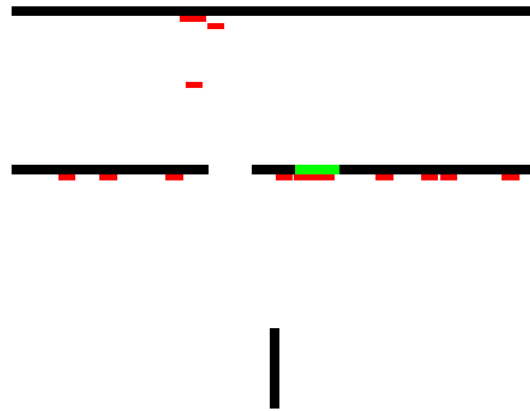
**Corpuscules et 1 fente**



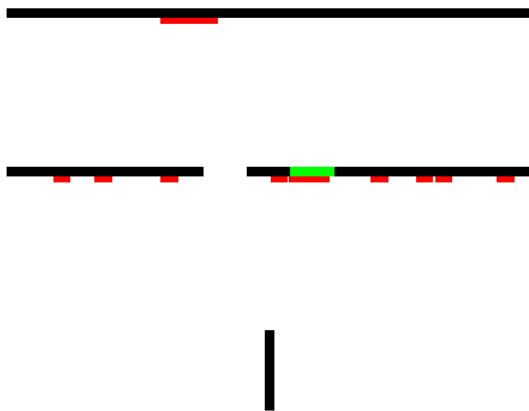
Corpuscules et 1 fente



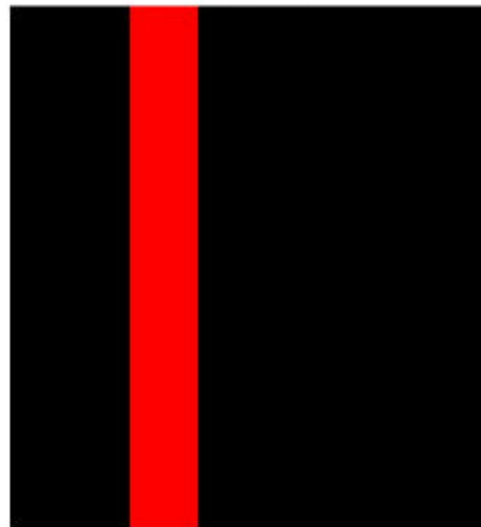
Corpuscules et 1 fente



Corpuscules et 1 fente

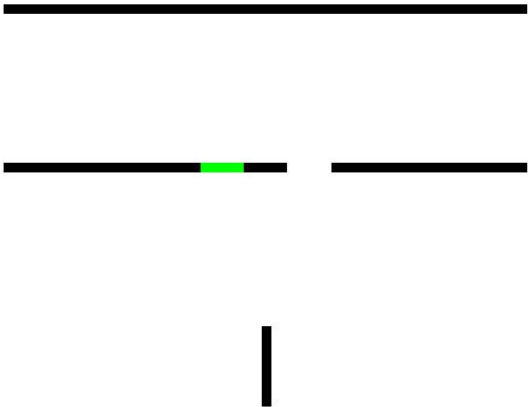


1 fente

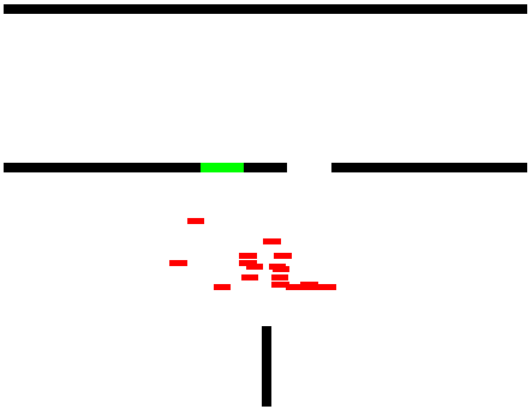


Balles classiques et une fente ouverte (droite ; vue de haut et vue de l'écran)

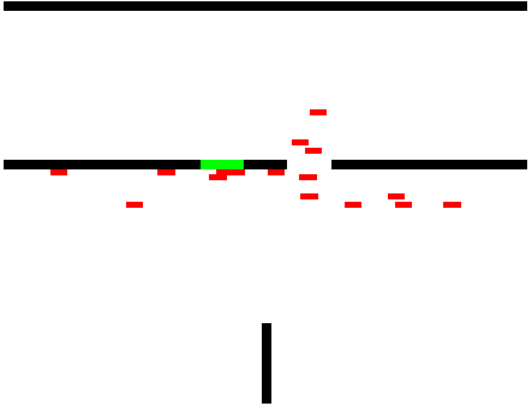
Corpuscules et 1 fente



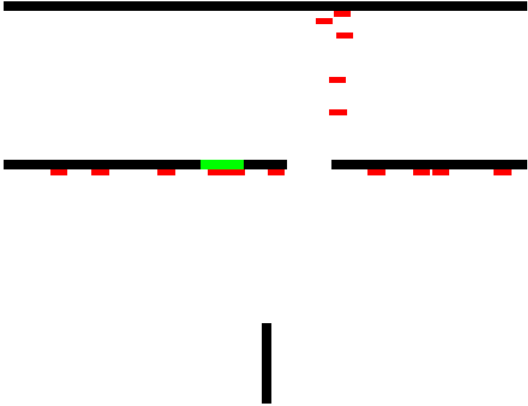
Corpuscules et 1 fente

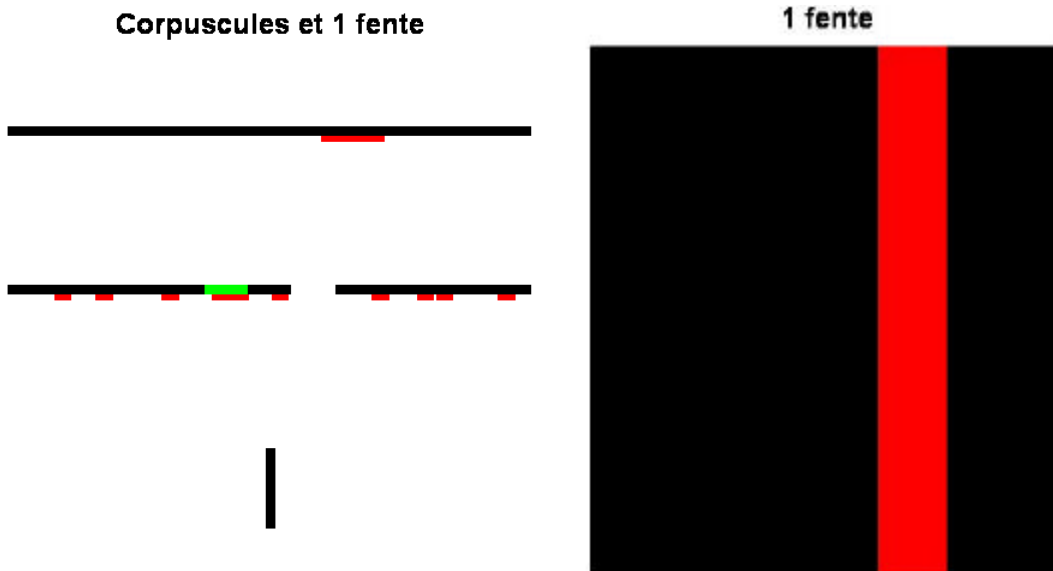


Corpuscules et 1 fente



Corpuscules et 1 fente





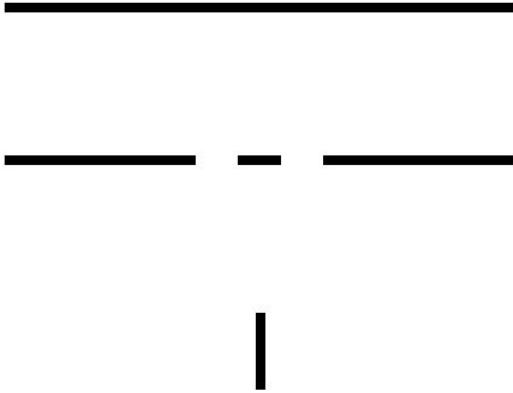
Pour conclure, notons qu'avec des corps classiques, l'image obtenue sur l'écran lorsque les deux fentes sont ouvertes est tout simplement la juxtaposition des images obtenues avec une seule fente ouverte.

### Ondes classiques

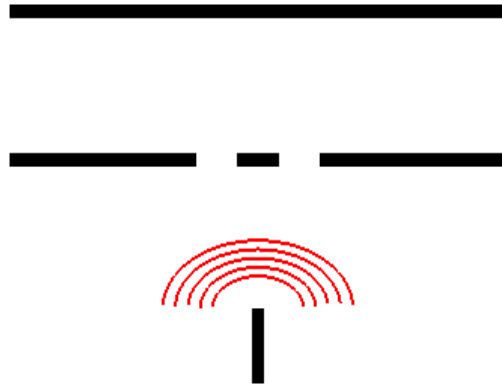
Pour étudier les ondes, on remplace le canon par une source lumineuse. L'onde ainsi émise prend de l'expansion en se propageant. S'il y a deux fentes dans le mur, uniquement les parties de l'onde qui arrivent vis-à-vis les fentes pourront se rendre à l'écran, les autres parties de l'onde étant tout simplement absorbées par l'écran. L'onde lumineuse se sépare donc en deux, puis chacune des ondes ainsi créées prend à son tour de l'expansion en se propageant. Ces deux ondes se chevauchent et se superposent : il y a alors de l'interférence constructive et destructive. L'image qui apparaît sur l'écran est alors un patron d'interférence, soit une alternance de franges sombres et brillantes, les premières correspondant aux zones d'interférence destructive et les secondes aux zones d'interférence constructive.

### Ondes classiques et deux fentes ouvertes (vue de haut et vue de l'écran)

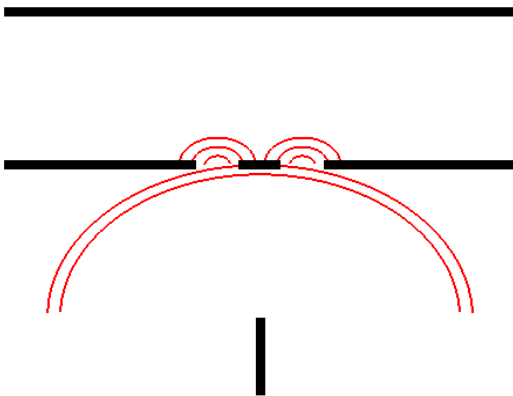
Onde et 2 fentes



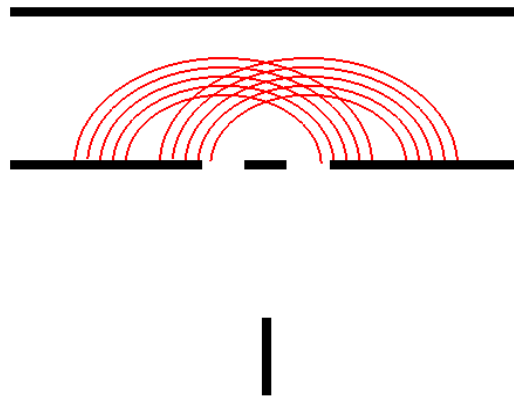
Onde et 2 fentes



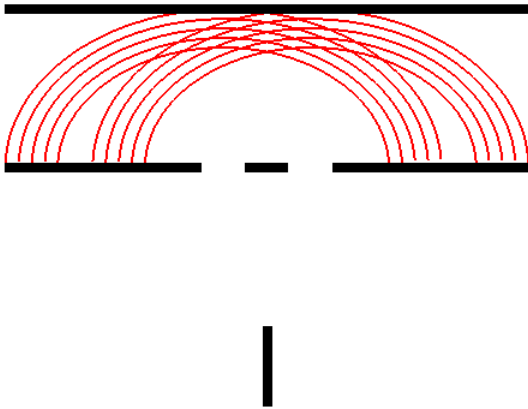
Onde et 2 fentes



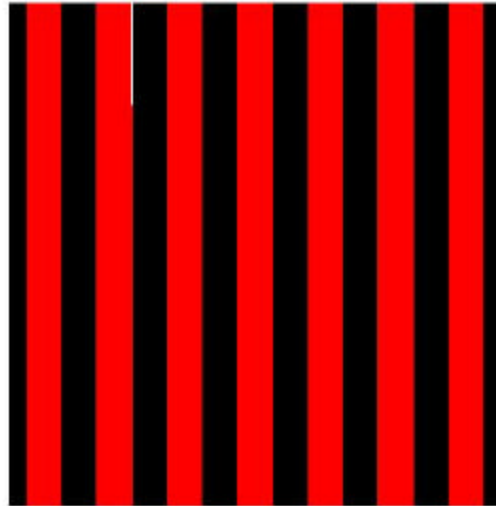
Onde et 2 fentes



**Onde et 2 fentes**



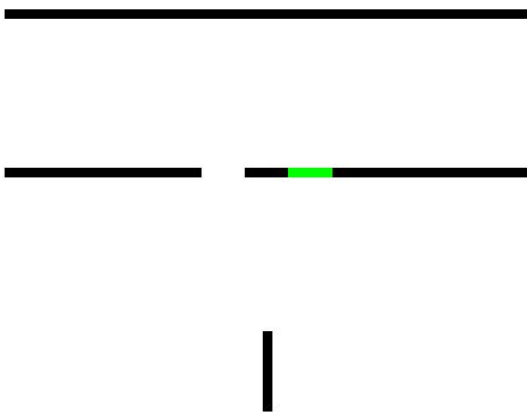
**2 fentes : interférence**



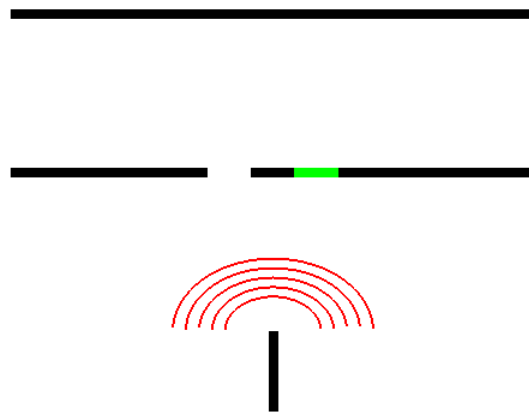
**Ondes classiques et une fente ouverte (gauche ; vue de haut et vue de l'écran)**

Si maintenant on bloque une des deux fentes, la situation est très différente. Il n'y a plus d'interférence : on observe plutôt un patron de diffraction, composé d'une large frange brillante au centre, et de franges secondaires plus étroites et moins brillantes de chaque côté.

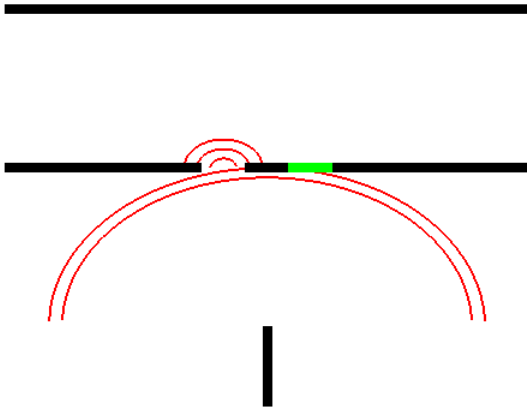
**Onde et 1 fente**



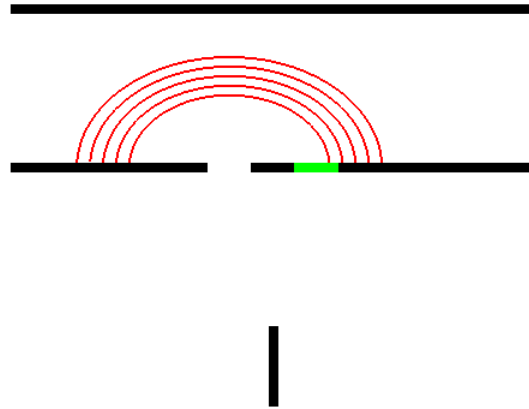
**Onde et 1 fente**



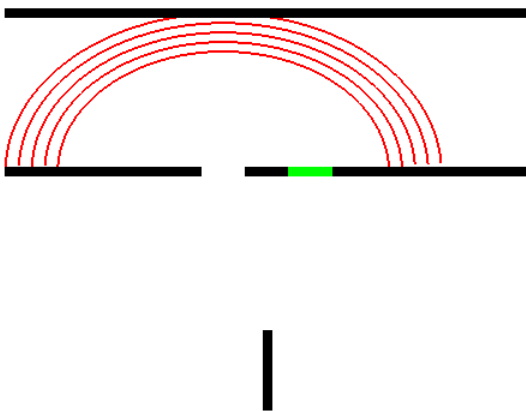
Onde et 1 fente



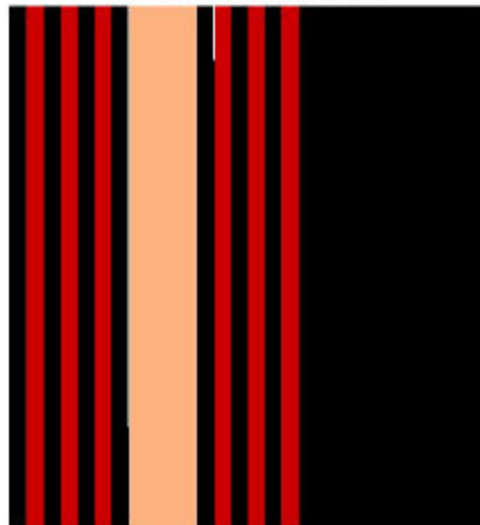
Onde et 1 fente



Onde et 1 fente



1 fente : diffraction

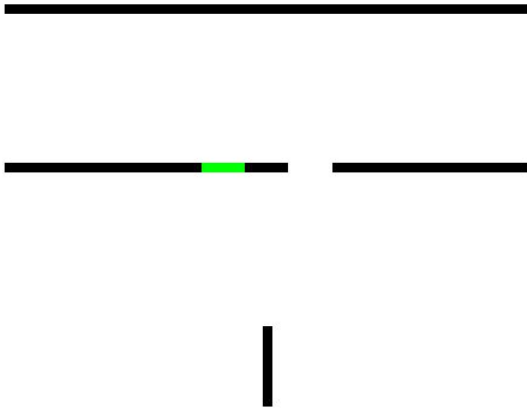


Puisqu'il n'y a ici qu'une seule fente ouverte, l'onde initiale n'engendre pas deux nouvelles ondes émergeant de la plaque perforée, mais une seule. Il n'y a donc pas de chevauchement entre deux ondes, et donc pas d'interférence. Par ailleurs, l'interaction entre l'onde et la fente modifie la structure de l'onde et lui donne la configuration d'un patron de diffraction.

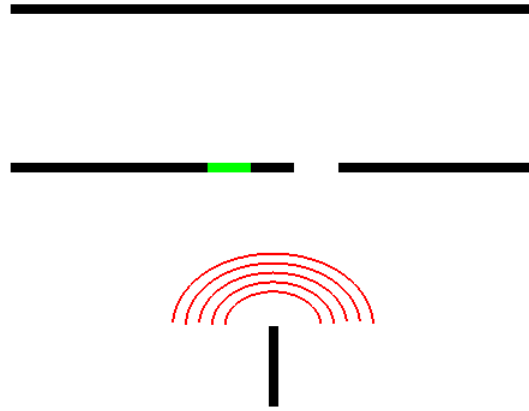
**Ondes classiques et une fente ouverte (droite ; vue de haut et vue de l'écran)**



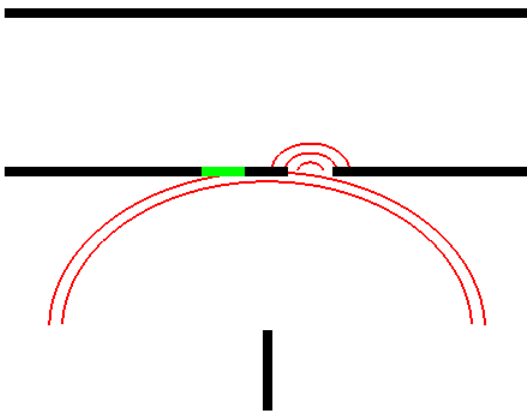
Onde et 1 fente



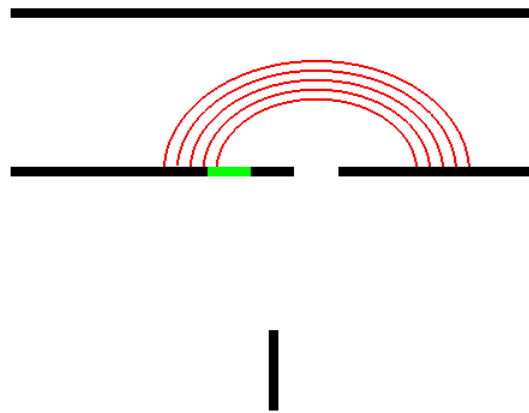
Onde et 1 fente

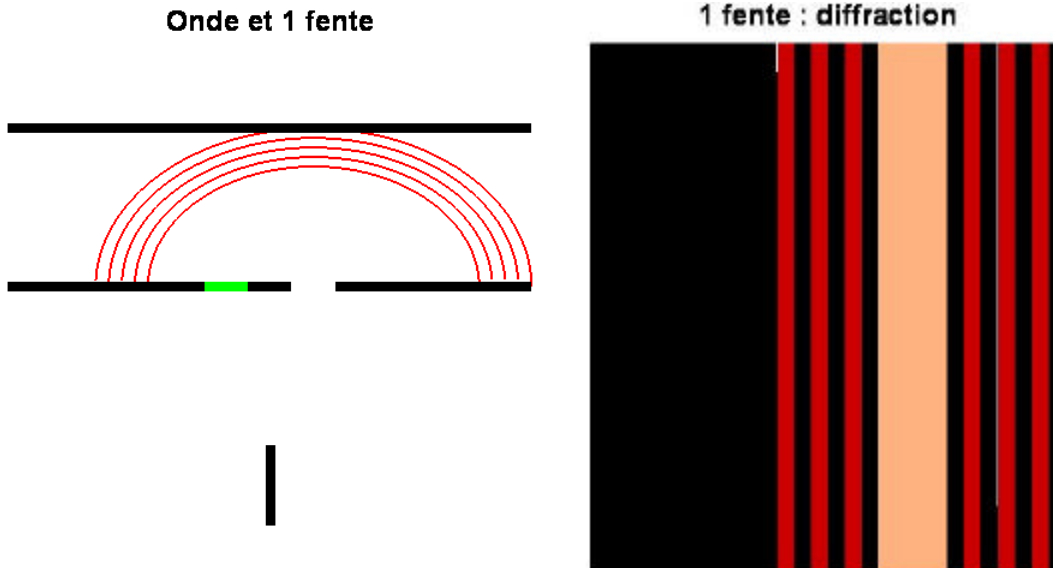


Onde et 1 fente



Onde et 1 fente





On constate que dans le cas des ondes, l'image qui apparaît sur l'écran lorsque les deux fentes sont ouvertes n'est pas la juxtaposition des images que l'on obtient avec une seule fente, contrairement au cas des corpuscules.

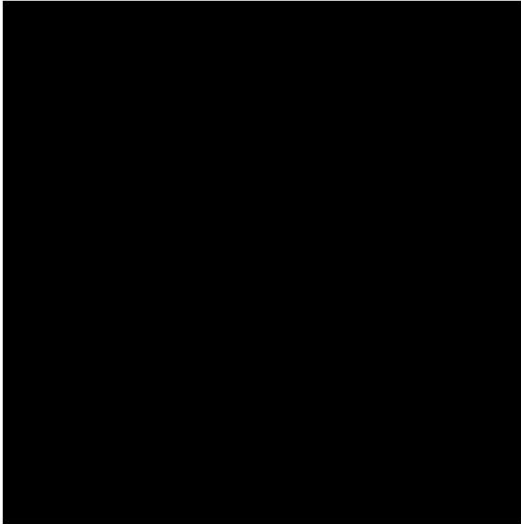
## B) Version quantique

### Particules quantiques et deux fentes ouvertes

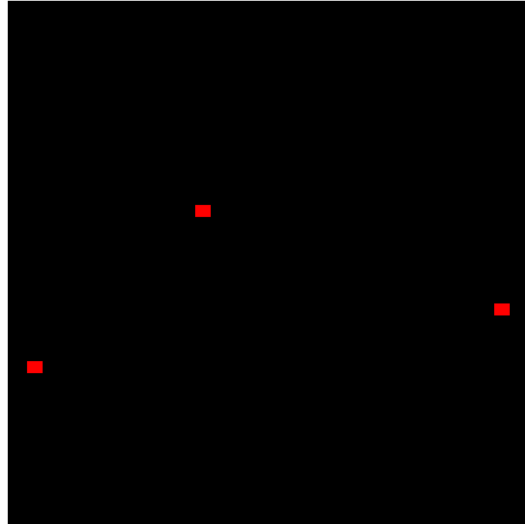
Poursuivons l'expérience effectuée avec un faisceau lumineux macroscopique, mais diminuons-en graduellement l'intensité. On s'attendrait à obtenir sur l'écran le même patron d'interférence, de moins en moins intense. C'est bien ce qui se produit au départ. Jusqu'à ce que l'intensité du faisceau soit réduite presque à zéro, mais pas tout à fait. Ce qui apparaît alors sur l'écran change complètement de nature : ce sont maintenant des points qui y apparaissent, et ce, au hasard !

### Vue de l'écran

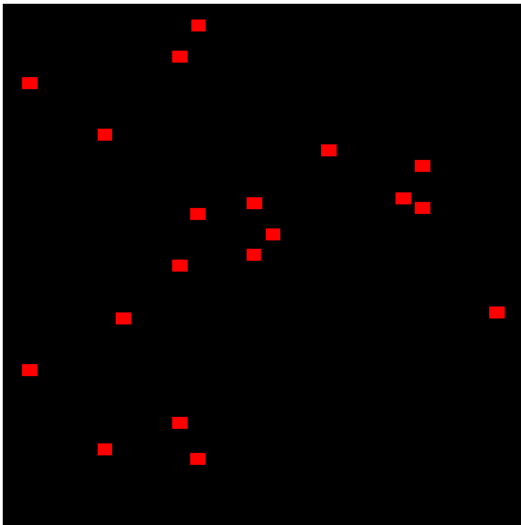
Paquets d'ondes réductibles



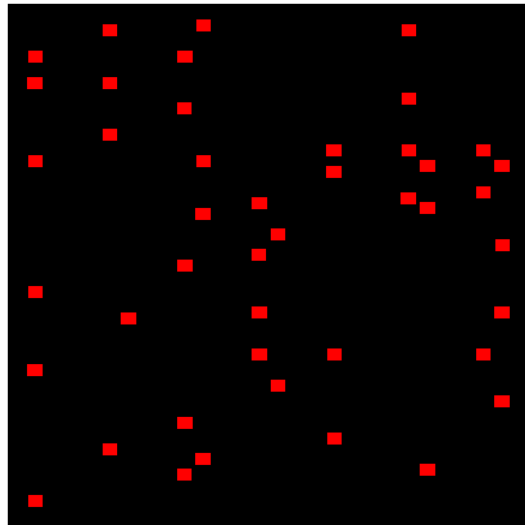
Paquets d'ondes réductibles



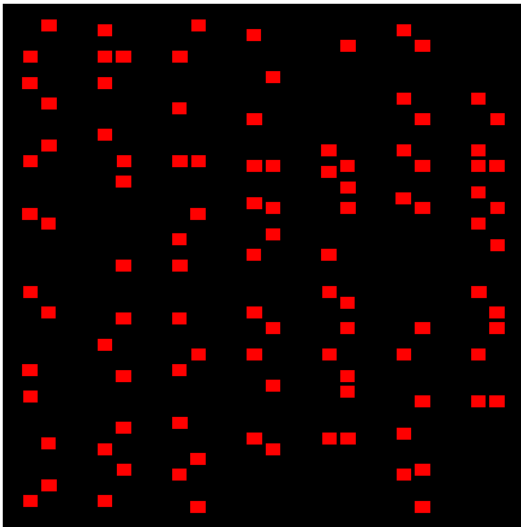
Paquets d'ondes réductibles



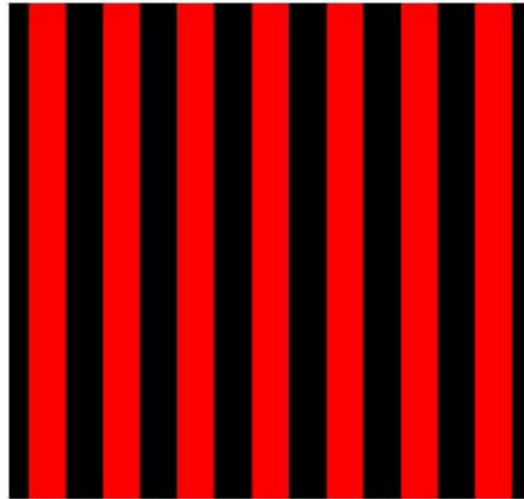
Paquets d'ondes réductibles



**Paquets d'ondes réductibles**



**2 fentes : interférence**



Si on laisse un grand nombre de points s'accumuler, ceux-ci finissent par reconstruire le patron d'interférence initial ! Le fait que des points apparaissent confirme que la lumière est bel et bien composée de particules, les photons, qui nous font penser à des corpuscules (petites billes dures). Dans cette version de l'expérience des fentes de Young, l'intensité du faisceau lumineux est si faible que la source se trouve à émettre un seul photon à la fois. Par ailleurs, le fait qu'une accumulation de points construit un patron d'interférence – une propriété exclusive aux ondes – et non les images des deux fentes révèle que les photons sont des particules qui ne se comportent pas comme des corpuscules classiques, mais plutôt, étrangement, comme des ondes. Ainsi, la lumière est à la fois onde et flux de corpuscules, elle manifeste une dualité onde-corpuscule.

Ajoutons que si l'on refait la même expérience avec des particules de matière, comme des électrons, on obtient exactement le même résultat. Ainsi, la matière manifeste également une dualité onde-corpuscule à l'échelle microscopique.

## **6) Le postulat de réduction du paquet d'ondes**

L'expérience des fentes de Young illustre bien l'une des problématiques centrales de la physique quantique : le problème de la mesure. D'une part, chaque grandeur physique est représentée, dans la théorie, par une superposition d'états. Par exemple, la grandeur physique « position » est représentée par le paquet d'ondes lui-même, qui est une superposition de positions, à savoir tous les points d'espace qu'il contient. D'autre part, lorsque l'on mesure une grandeur physique, le résultat de la mesure donne toujours une valeur numérique unique, et non un ensemble de valeurs numériques. Ainsi, si l'on mesure la position finale d'une particule dans l'expérience des fentes de Young à l'aide de l'écran, on obtient un point d'impact unique et non une surface d'impact correspondant à tous les points d'espace situés dans un paquet d'ondes.

Le problème de la mesure en physique quantique peut s'énoncer ainsi : « Comment expliquer que, d'une part, la théorie attribue aux grandeurs physiques des superpositions d'états, alors que, d'autre part, les mesures donnent des valeurs numériques uniques (à l'intérieur des marges d'incertitude des instruments) ? » Notons que le recours, par la théorie, à des superpositions d'états est nécessaire pour que les calculs concordent avec les résultats d'expériences. Seuls des calculs effectués à partir de superpositions d'états permettent de prédire correctement les résultats d'expériences de physique quantique.

Pour répondre au problème de la mesure en physique quantique, John von Neumann introduisit en 1932 un nouveau postulat, le postulat de « réduction du paquet d'ondes », aussi nommé postulat d' « effondrement de la fonction d'onde ». La fonction d'onde est une équation et le paquet d'ondes est l'objet représenté par cette équation. On peut faire une analogie : la fonction d'onde se compare à une partition et le paquet d'ondes à l'exécution de cette partition par un instrument de musique.

Von Neumann affirme que l'interaction entre une particule quantique, représentée par un paquet d'ondes, et un instrument de mesure macroscopique, comme un écran, provoque une transformation physique *fondamentale* et *aléatoire* du paquet d'ondes. D'une part, cette interaction « réduit » la superposition d'états initiale de la grandeur physique mesurée à une valeur numérique unique. Lorsqu'un paquet d'ondes, qui correspond à la superposition de positions initiale, interagit avec un écran, qui est ici un instrument servant à mesurer la position, il est physiquement réduit à un point d'impact, donc à une position finale unique. D'autre part, cette valeur numérique unique finale peut être n'importe laquelle des valeurs numériques de la superposition d'états initiale, au hasard. Le point d'impact peut apparaître n'importe où sur l'écran, au hasard, en fonction de la structure du paquet d'ondes juste avant le contact.

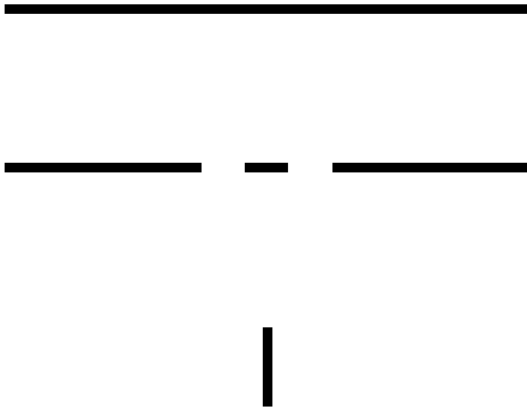
On peut faire une analogie : un paquet d'ondes est comme une bulle de savon, fragile. Mesurer la position d'une particule revient à tenter d'attraper une bulle de savon avec les doigts. Conséquence : elle éclate. On suppose qu'un fragment en subsiste, au hasard.

Si l'on mesure la vitesse d'une particule, ce sera le spectre de vitesses (représenté par le spectre des ondes de de Broglie) qui sera réduit à une valeur unique de vitesse, au hasard.

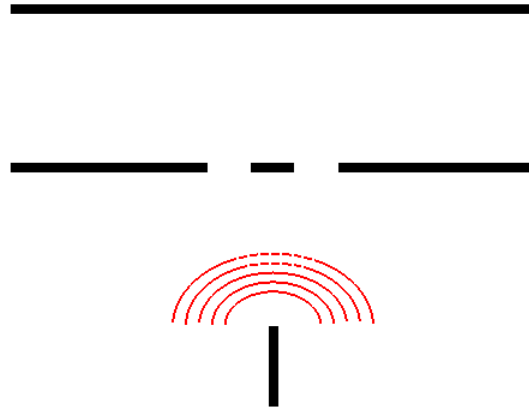
### **Vue de haut**

Dans nos animations simplifiées, le paquet d'ondes qui représente une particule unique, de matière ou de lumière, est identique à l'onde macroscopique de la version classique de l'expérience.

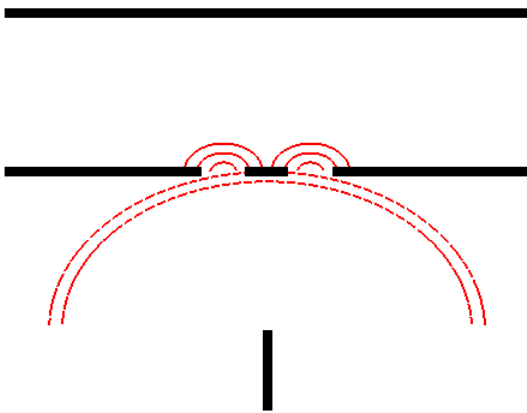
Paquet d'ondes réductible



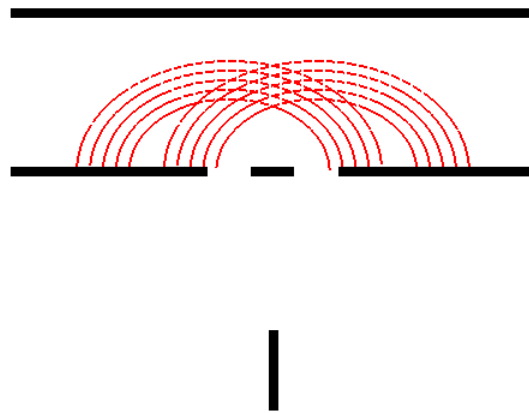
Paquet d'ondes réductible



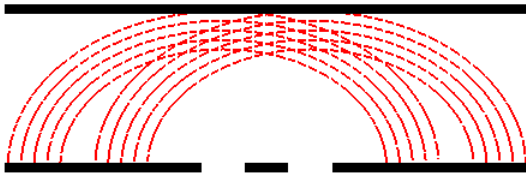
Paquet d'ondes réductible



Paquet d'ondes réductible



**Paquet d'ondes réductible**



**Paquet d'ondes réductible**



À chaque fois que l'on recommence l'expérience, le point en lequel le paquet d'ondes est réduit est différent, au hasard.

**Paquet d'ondes réductible**



On remarque que lorsque la particule traverse la plaque perforée, elle se sépare en deux paquets d'ondes. Voilà un phénomène exclusivement quantique : une particule est habituellement représentée par un paquet d'ondes, mais elle peut l'être aussi par plusieurs paquets d'ondes simultanément ! Le conférencier nomme ce phénomène « multiplication ». La particule n'est pas devenue deux particules ni deux demi-particules : il n'existe toujours qu'une seule et unique particule, mais qui existe en deux volumes (en deux paquets d'ondes) à la fois ! Par la suite, ces deux paquets d'ondes se chevauchent et se superposent ; ils se fusionnent en un nouveau paquet

d'ondes unique, qui comporte des zones d'interférence constructive et destructive. On dit que la particule interfère avec elle-même.

Avec le postulat de réduction, on explique le point d'impact qu'une particule, de matière ou de lumière, produit sur l'écran comme étant l'empreinte de ce nouveau paquet d'ondes unique qui est réduit au moment du contact avec l'écran, telle une bulle de savon qui éclate lorsque qu'elle se heurte à un mur, en supposant qu'il en subsiste un fragment, au hasard. On peut donc dire qu'une particule ne se comporte jamais comme un corpuscule, mais toujours comme une onde (plus précisément comme un paquet d'ondes), avec cette particularité que l'onde est fragile et se réduit (éclate) lorsqu'elle interagit avec un objet macroscopique, comme un écran ou tout autre instrument de mesure. La dualité onde-corpuscule est donc à prendre dans un sens métaphorique et non littéral.

La règle de probabilité que Max Born avait énoncée en 1926 permet de calculer la probabilité que ce soit telle valeur plutôt que telle autre que l'obtienne lors d'une mesure, après une réduction. Si l'on mesure la position d'une particule, la probabilité d'obtenir telle valeur plutôt que telle autre (la probabilité que le point d'impact apparaisse sur l'écran à tel endroit plutôt qu'à tel autre) est proportionnelle à l'amplitude du paquet d'ondes (hauteur d'une crête ou profondeur d'un creux), au carré, pour cette valeur de position. Dans les paquets d'ondes large et étroit que nous avons illustrés de profil, plus tôt, avec leurs spectres d'ondes de de Broglie, la probabilité est maximale pour la position située au centre et minimale pour les positions situées aux extrémités. Dans le cas de l'expérience des fentes de Young, les régions d'interférence destructive dans le paquet d'ondes unique, juste avant le contact avec l'écran, ont une amplitude nulle : la probabilité que le point apparaisse dans ces régions est donc nulle. C'est pourquoi les points n'apparaissent sur l'écran que dans certaines bandes spécifiques, les franges brillantes, qui correspondent aux zones d'interférence constructive dans le paquet d'ondes unique, où l'amplitude est non nulle.

Si l'on mesure la vitesse d'une particule, la probabilité d'obtenir telle valeur plutôt que telle autre est proportionnelle à l'amplitude de l'onde de de Broglie associée à cette vitesse (selon la relation

$v \propto \frac{1}{L}$ ), au carré. Dans les deux paquets d'ondes que nous avons illustrés de profil, plus tôt, les ondes bleues ( $L_{\max} \rightarrow v_{\min}$ ) et verte ( $L_{\min} \rightarrow v_{\max}$ ) ont des amplitudes égales, alors que l'onde rouge ( $L_{\text{moy}} \rightarrow v_{\text{moy}}$ ) a une amplitude deux fois plus grande. Ainsi, si l'on mesurait « la » vitesse de ces paquets d'ondes, les chances d'obtenir  $v_{\min}$  ou  $v_{\max}$  seraient égales, et les chances d'obtenir  $v_{\text{moy}}$  seraient quatre fois supérieures (2 au carré). Cela signifie que si l'on répétait la même mesure de vitesse un très grand nombre de fois, on obtiendrait  $v_{\text{moy}}$  dans une proportion de 4 fois sur 6,  $v_{\min}$  de 1 fois sur 6 et  $v_{\max}$  de 1 fois sur 6. Ces résultats seraient obtenus dans le désordre, au hasard, comme lorsqu'on lance un dé.

En 1932, von Neumann ne fait que postuler la réduction du paquet d'ondes, ou effondrement de la fonction d'onde, que l'on peut aussi nommer « effet de l'observateur en physique quantique ». Il ne propose aucun mécanisme physique pour l'expliquer.

## **A) Deux types d'évolution en physique quantique**



Certains affirment que la physique quantique est indéterministe. Cela est une généralisation hâtive. Le hasard intervient bel et bien en physique quantique, mais *uniquement lors d'une mesure*. Une particule quantique peut ainsi évoluer de deux manières différentes. Une particule non observée évolue toujours de manière déterministe, obéissant alors à l'équation de Schrödinger, l'équation centrale de la physique quantique. Ainsi, dans nos animations, l'évolution des paquets d'ondes avant une mesure est toujours rigoureusement identique dans des situations identiques. L'équation de Schrödinger, qui régit le comportement des particules non observées, est déterministe au même titre que la physique classique. Par ailleurs, lorsque l'on observe une particule, on modifie son environnement physique en y insérant un nouvel élément, l'instrument de mesure. C'est cette perturbation de l'environnement de la particule qui provoque une perturbation de son évolution : au moment de l'interaction avec l'instrument, et en raison de cette interaction, l'état de la particule est perturbé de manière fondamentale (réduction) et aléatoire (probabilités). C'est au moment de la réduction – et uniquement à ce moment – que le hasard entre en jeu en physique quantique. Autrement dit, malgré ce qu'affirment les discours habituels, la physique quantique est fondamentalement déterministe, à l'instar de la physique classique. À une exception près : les mesures.

On nomme «évolution unitaire» l'évolution déterministe d'une particule non observée, régie par l'équation de Schrödinger. Dans ce cas, le hasard ne se manifeste pas. Le postulat de réduction de von Neumann et la règle de Born (probabilités) ne s'appliquent pas. On nomme «réduction non unitaire» la perturbation de l'état d'une particule provoquée par une interaction avec un instrument de mesure. C'est uniquement lors d'une réduction non unitaire que le postulat de réduction de von Neumann et la règle de Born (probabilités) s'appliquent. Dans ce cas, c'est l'équation de Schrödinger qui ne s'applique pas.

Pour terminer, indiquons que la conception répandue du hasard, selon laquelle il signifierait que n'importe quoi peut survenir, est erronée : le hasard est en soi une forme de déterminisme, de nature statistique. Le hasard signifie que, bien que le résultat d'une mesure est imprévisible et incontrôlable, l'ensemble des résultats possibles ainsi que les probabilités d'obtenir chacun sont rigoureusement déterminés par des lois mathématiques. Et ce, de manière analogue au résultat que l'on obtient en lançant un dé. En physique quantique, l'ensemble des résultats possibles et les probabilités d'obtenir chacun sont rigoureusement déterminés par le paquet d'ondes, son spectre d'ondes de de Broglie et la règle de Born.

## **B) Deux interprétations philosophiques du postulat de réduction du paquet d'ondes**

L'interprétation de Copenhague donne la signification suivante à la réduction provoquée par une mesure : c'est le fait de mesurer une grandeur physique, comme la position ou la vitesse, qui lui confère une valeur numérique, qui la fait passer de floue à définie. La mesure provoque la réduction de la superposition d'états initiale à une valeur numérique unique, à l'intérieur de la marge d'incertitude de l'instrument. L'interprétation de Copenhague dira qu'une particule non observée existe dans un état potentiel, voire virtuel, en tant qu'ensemble de possibilités, et que c'est le fait de l'observer qui la rend réelle, en définissant au moins l'une de ses grandeurs physiques, la position et/ou la vitesse. Une particule non observée est dématérialisée : c'est l'effet de l'observateur, qui perturbe une particule de manière fondamentale (réduction) et aléatoire

(probabilités), qui la matérialise. Et ce, contrairement aux corps matériels macroscopiques de la physique classique, dont le point situé au centre possède en tout temps une position et une vitesse bien définies, indépendamment que ces grandeurs physiques soient mesurées ou non. L'interprétation de Copenhague attribue donc au rôle spécial à l'observateur en physique quantique.

L'interprétation naïve est, quant à elle, beaucoup plus terre-à-terre. La réduction est interprétée simplement comme une modification physique de l'état d'une particule par une interaction physique avec un instrument de mesure. L'introduction d'un instrument dans l'environnement d'une particule modifie cet environnement : puisque l'état physique d'une particule dépend de son environnement, cet état est alors modifié. L'interaction physique entre l'instrument et une particule, qui est littéralement un paquet d'ondes, modifie physiquement le paquet d'ondes. Si l'instrument employé sert à mesurer la position, le paquet d'ondes est réduit : l'interaction avec l'instrument a pour conséquence de rapetisser la taille de la particule, à l'instar d'une bulle de savon qui éclate lorsqu'on tente de la saisir et dont il subsisterait un fragment, au hasard. Si l'instrument employé sert à mesurer la vitesse, c'est le spectre de vitesses qui est réduit. Et c'est tout : selon l'interprétation naïve, il n'y a rien de plus profond à déduire du postulat de réduction. L'interprétation naïve n'attribue aucun rôle spécial à l'observateur en physique quantique : l'effet de l'observateur est un type d'interaction physique de même nature que tous les autres. Les particules sont en tout temps réelles, matérielles, indépendamment d'être observées ou non.

Ajoutons que l'interprétation naïve implique qu'une particule quantique peut atteindre une taille macroscopique ! Ainsi, dans l'expérience des fentes de Young, la particule, juste avant de toucher l'écran et d'être réduite, est devenue aussi grande que lui, elle le couvre en entier ! Forcément : le point d'impact qui apparaît au moment de la réduction est un fragment du paquet d'ondes final. Si ce point d'impact peut apparaître n'importe où sur l'écran, au hasard (à l'intérieur d'une frange brillante), cela implique nécessairement que le paquet d'ondes final couvre tout l'écran. Une telle affirmation est certes extravagante, mais certainement pas davantage que les affirmations de l'interprétation de Copenhague. Cette affirmation a même le mérite supplémentaire, par rapport aux affirmations de l'interprétation de Copenhague, de se fonder exclusivement sur des concepts quantiques, ceux de superposition d'états et de réduction, à l'exclusion donc de tout concept classique.

À nouveau, Fortier affirme que l'interprétation de Copenhague est erronée, parce qu'elle se fonde implicitement sur deux concepts classiques, ceux de corpuscule et d'état unique, qu'elle tente de concilier avec, ici, les concepts quantiques de superposition d'états et de réduction. Les concepts de corpuscule et d'état unique n'existent tout simplement pas dans le formalisme mathématique de la physique quantique. À nouveau, le conférencier affirme que l'interprétation de Copenhague est semi-classique, ou semi-quantique, et que seule l'interprétation naïve est véritablement et entièrement quantique.

### **C) Mesures et relation de Heisenberg**

La relation de Heisenberg stipule que la largeur du paquet d'ondes et la largeur du spectre de vitesses sont inversement proportionnelles : plus l'une est petite et plus l'autre est grande. Si l'on mesure la position d'une particule, on provoque la réduction du paquet d'ondes. Conséquence : le

spectre de vitesses s'élargit. À l'inverse, si l'on mesure la vitesse d'une particule, c'est le spectre de vitesses qui est réduit. Conséquence : le paquet d'ondes s'élargit. La relation de Heisenberg est une propriété intrinsèque aux paquets d'ondes quantiques, donc aux particules elles-mêmes : elle n'est pas due à une imperfection des instruments de mesure. Même s'il était possible d'avoir des instruments de mesure parfaits, la relation de Heisenberg s'appliquerait toujours.

Notons qu'il est possible de mesurer simultanément la position et la vitesse d'une particule, avec deux instruments différents, mais alors ces deux mesures simultanées ne pourront réduire simultanément le paquet d'ondes à un point et le spectre de vitesses à une vitesse unique. On obtiendra plutôt un paquet d'ondes plus étroit et un spectre de vitesses plus étroit, le produit de leurs largeurs demeurant supérieur ou égal à la valeur minimale stipulée par la relation de Heisenberg.

L'interprétation de Copenhague voit ici à nouveau une incompatibilité entre les grandeurs physiques position et vitesse. C'est par une mesure qu'une grandeur physique passe de floue à définie. Ainsi, en vertu de la relation de Heisenberg, il est impossible de définir simultanément la position et la vitesse d'une particule, par des mesures, avec une précision qui irait au-delà de ce que permet la relation de Heisenberg. Le produit de leurs incertitudes intrinsèques,  $\Delta x$  et  $\Delta v$ , doit demeurer supérieur ou égal à la valeur minimale stipulée par la relation de Heisenberg.

L'interprétation naïve dira plutôt que, étant donné que les grandeurs physiques position et vitesse sont interdépendantes, alors mesurer l'une de ces deux grandeurs – et perturber ainsi son état en provoquant la réduction – perturbe automatiquement l'autre. La relation de Heisenberg étant une relation de réciprocity inverse, mesurer la position – et ainsi réduire la largeur du paquet d'ondes, donc la taille de la particule – entraîne une augmentation de la largeur du spectre de vitesses. À l'inverse, mesurer la vitesse – et ainsi réduire la largeur du spectre de vitesses – entraîne une augmentation de la largeur du paquet d'ondes, donc de la taille de la particule. Autrement dit, puisque les grandeurs physiques position et vitesse sont interdépendantes en physique quantique, l'effet de l'observateur les perturbe nécessairement toutes les deux simultanément, et ce, même si la mesure n'est effectuée que sur l'une de ces deux grandeurs. L'interdépendance entre position et vitesse ne dépend pas du processus de la mesure, mais est une propriété inhérente aux paquets d'ondes, donc aux particules.

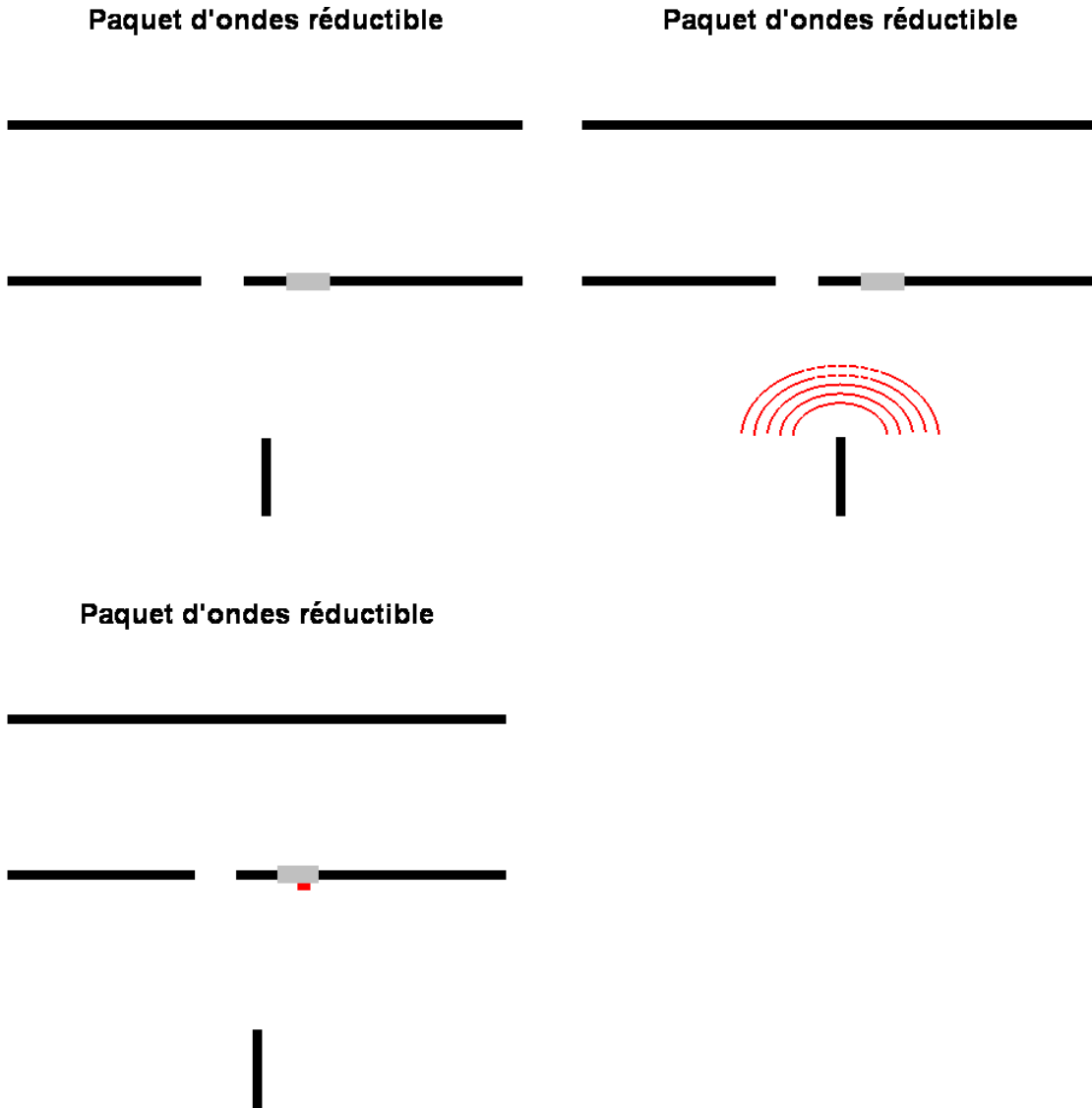
À nouveau, Fortier affirme que l'interprétation de Copenhague est erronée, parce qu'elle se fonde implicitement sur deux concepts classiques, ceux de corpuscule et d'état unique, qu'elle tente de concilier avec, ici, les concepts quantiques de superposition d'états, de relation de Heisenberg et de réduction. Les concepts de corpuscule et d'état unique n'existent tout simplement pas dans le formalisme mathématique de la physique quantique. À nouveau, le conférencier affirme que l'interprétation de Copenhague est semi-classique, ou semi-quantique, et que seule l'interprétation naïve est véritablement et entièrement quantique.

## **D) Particules quantiques, une fente ouverte (la gauche) et un détecteur**

Devant l'expérience des fentes de Young, on peut être tenté de se poser la question : « par quelle fente la particule passe-t-elle ? » On peut chercher à répondre à cette question expérimentalement, en insérant un détecteur dans l'une des deux fentes, disons la droite. Si le

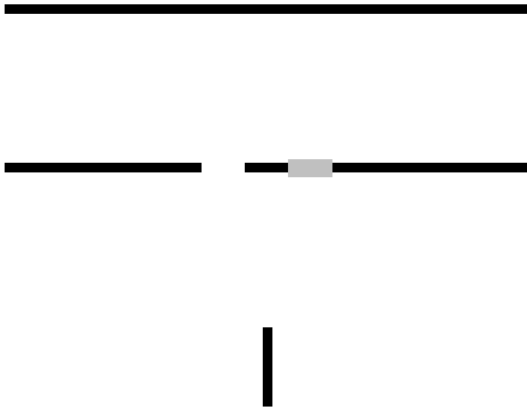
détecteur enregistre le passage de la particule, on sait qu'elle passait par la fente de droite. Dans ce cas, aucun point n'apparaît sur l'écran, puisque la particule a été arrêtée par le détecteur. La détection de la particule implique que le paquet d'ondes s'est réduit sur le détecteur.

### Vue de haut

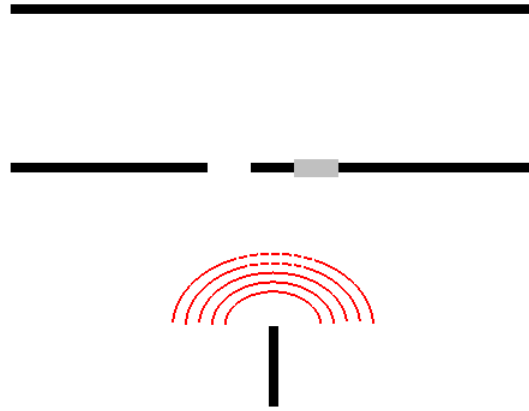


Par contre, si le détecteur n'enregistre pas le passage de la particule, alors on sait qu'elle passait par la fente de gauche. Dans ce cas, un point apparaît sur l'écran, au hasard, selon la structure du paquet d'ondes final. Cette structure est alors celle d'un patron de diffraction (et non d'interférence). C'est au hasard que le paquet d'ondes se réduit ou non sur le détecteur.

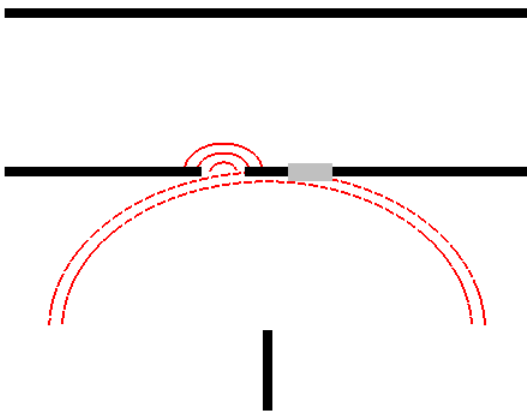
Paquet d'ondes réductible



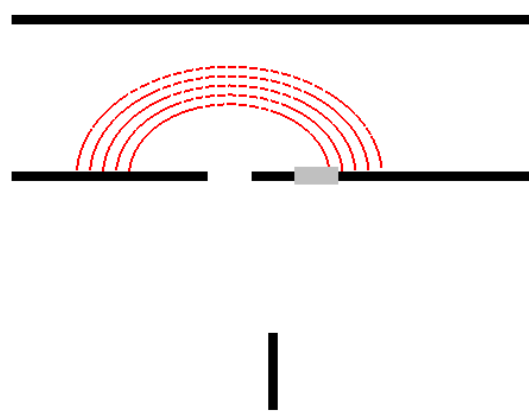
Paquet d'ondes réductible

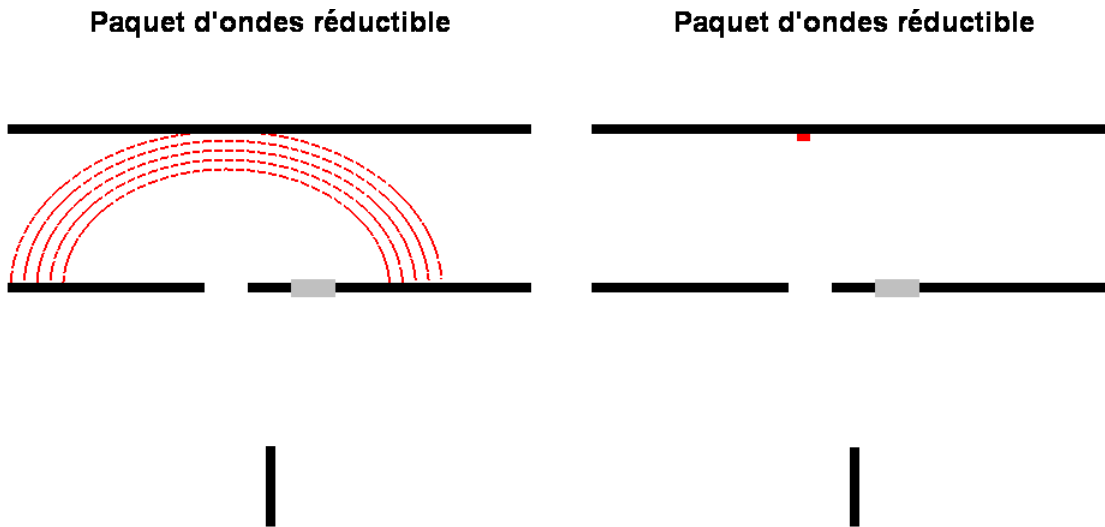


Paquet d'ondes réductible



Paquet d'ondes réductible





Laissons l'expérience se poursuivre et les points s'accumuler. À chaque fois, le point apparaît en un endroit différent, au hasard. L'ensemble d'un grand nombre de points accumulés reconstruira ici un patron de diffraction, aligné avec la fente gauche, à l'instar du résultat obtenu avec des ondes classiques et une fente ouverte. L'introduction du détecteur a modifié le résultat de l'expérience.

Notons qu'il arrive aussi, au hasard, que le paquet d'ondes se réduise sur la plaque perforée. Dans ce cas, le détecteur n'enregistre rien et aucun point d'impact n'apparaît sur l'écran.

### Par quelle fente la particule passe-t-elle ?

En réalité, se demander « par quelle fente la particule passe-t-elle ? » est une question dépourvue de sens en physique quantique. Les particules, lorsqu'elles ne sont pas observées (donc, lorsqu'il n'y a pas de réduction), se comportent comme des ondes, et non comme des corpuscules, et en conséquence, elles passent par tous les chemins disponibles à la fois. Passer par tous les chemins disponibles à la fois est le comportement normal des ondes, qui sont, par nature, des entités étendues dans l'espace.

Si les deux fentes sont libres, la particule passe par les deux fentes simultanément. Elle se multiplie alors en deux paquets d'ondes, puis interfère avec elle-même : le paquet d'ondes unique qui en résulte possède une structure de patron d'interférence. Lorsque ce paquet d'ondes unique touche l'écran, il se réduit en un point, qui peut apparaître n'importe où, au hasard, *dans une frange brillante*. Une accumulation de points reconstruit ainsi un patron d'interférence.

Par contre, lorsque l'on installe un détecteur devant la fente de droite, on se trouve de la sorte à la bloquer. Alors, ou bien le paquet d'ondes initial se réduit sur le détecteur, qui enregistre la particule, et dans ce cas rien ne se rend jusqu'à l'écran. Le paquet d'ondes n'est alors passé par *aucune* fente : il s'est réduit sur le détecteur. Ou bien le paquet d'ondes initial ne se réduit pas sur le détecteur, qui n'enregistre rien, et les parties du paquet d'ondes initial alignées avec la fente de

gauche – le seul chemin disponible ici – passent par cette fente et se rendent à l'écran. Dans ce cas, après le passage au travers de la fente, la particule ne s'est pas multipliée ; elle ne peut donc pas interférer avec elle-même. Alors, forcément, le paquet d'ondes final ne prend pas la structure d'un patron d'interférence. Il prend cependant la structure d'un patron de diffraction, en raison de l'interaction avec la fente. Lorsque ce paquet d'ondes final touche l'écran, il se réduit en un point, qui peut apparaître n'importe où, au hasard, *dans une frange brillante* : une accumulation de points reconstruit alors un patron de *diffraction*.

## 7) Les systèmes quantiques et l'effet EPR

En 1935, trois physiciens, Einstein, Podolsky et Rosen, publient un article dans lequel ils prétendent démontrer que la mécanique quantique est une théorie incomplète. Leur raisonnement est connu sous le nom de *critique EPR*. Ils y discutent d'un phénomène prédit par le formalisme mathématique, l'enchevêtrement, aussi nommé intrication ou inséparabilité. Voyons de quoi il en retourne.

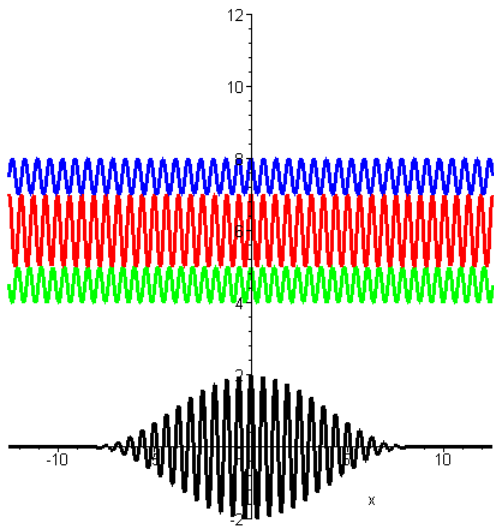
### A) L'enchevêtrement de particules selon le formalisme mathématique

Nous avons vu que des ondes peuvent se superposer et donner ainsi un paquet d'ondes. Or, un paquet d'ondes est lui-même une onde, l'onde unique qui résulte de cette superposition. Par conséquent, des paquets d'ondes doivent pouvoir également se superposer : c'est exactement ce que prévoit la théorie. Deux particules qui interagissent se chevauchent et se superposent : elles « fusionnent » et ne forment plus alors qu'un seul et unique super paquet d'ondes, appelé système quantique. Selon le formalisme mathématique, deux particules qui interagissent perdent leur individualité ! Leurs évolutions respectives sont dès lors inséparables : tout ce qui arrive à l'une a automatiquement et instantanément une répercussion sur l'autre, puisqu'elles sont désormais indissociables, «inséparables », puisque dès lors elles forment une seule et unique entité, le système. C'est la formation d'un tel système que l'on nomme enchevêtrement, intrication ou encore inséparabilité.

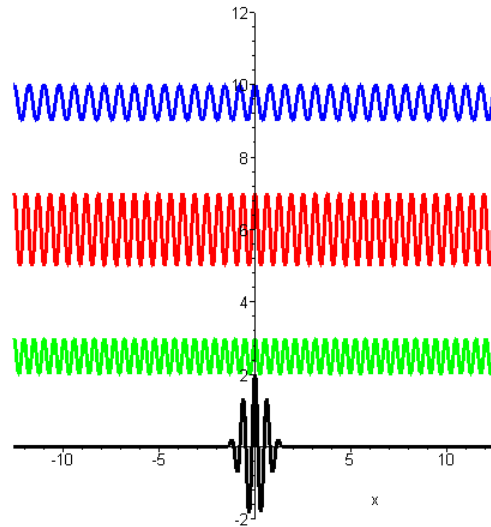
Dans l'animation simplifiée qui suit, nous superposons les deux paquets d'ondes que nous avons déjà étudiés, de profil, avec leurs spectres d'ondes de de Broglie.

### Vue de profil

### Ondes de de Broglie et paquet d'ondes



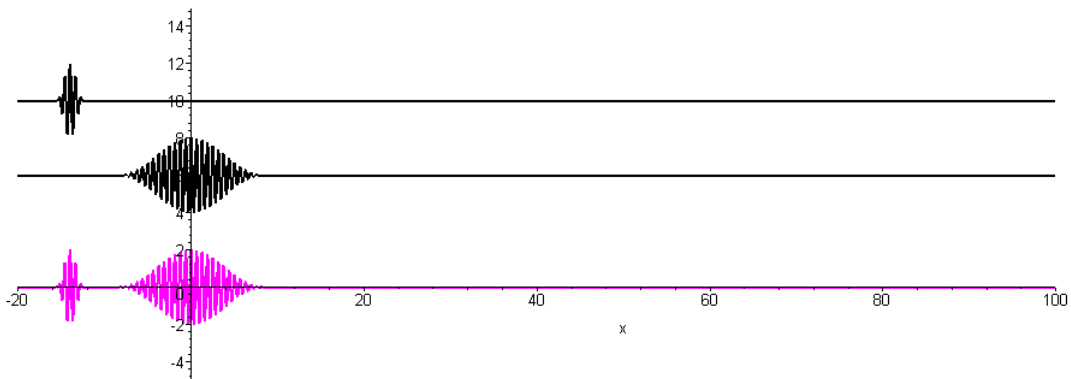
### Ondes de de Broglie et paquet d'ondes



Le paquet d'ondes étroit se déplacera plus rapidement que le paquet d'ondes large. Le super paquet d'ondes violet sera l'onde unique qui résulte de la superposition des deux paquets d'ondes noirs.

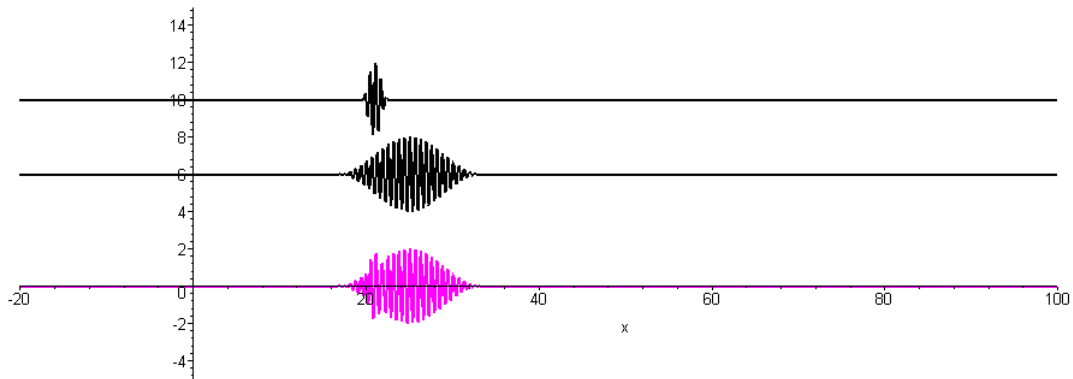
### Vue de profil

#### Systeme de deux particules

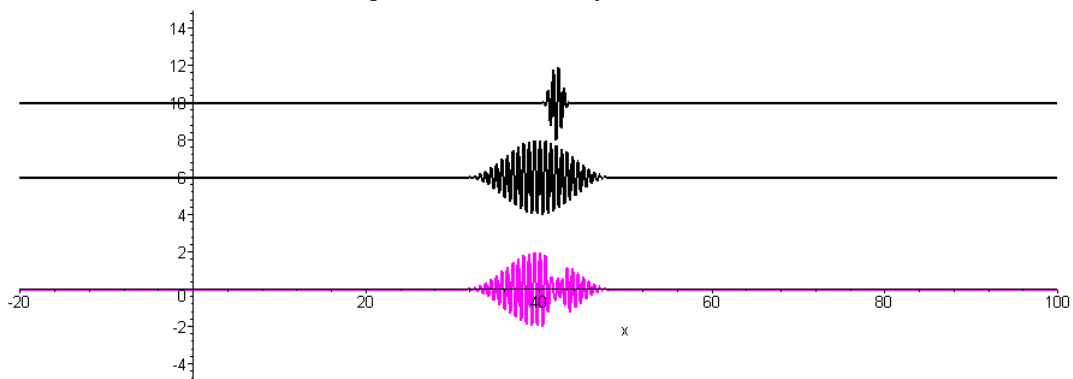




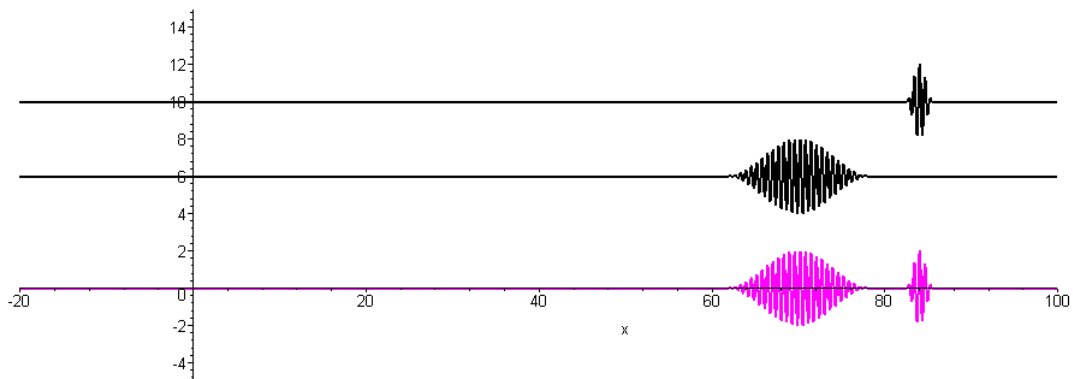
### Système de deux particules



### Système de deux particules



### Système de deux particules



On peut voir, dans le super paquet d'ondes violet, alternativement de l'interférence constructive et destructive. Notre animation est simplifiée : le paquet d'ondes étroit étant plus rapide, les deux paquets d'ondes noirs finissent par reprendre leur individualité spontanément, lorsque le paquet d'ondes étroit dépasse le large. Par contre, dans la réalité, deux particules qui s'enchevêtrent demeurent enchevêtrées tant que le système n'est pas perturbé par son environnement.

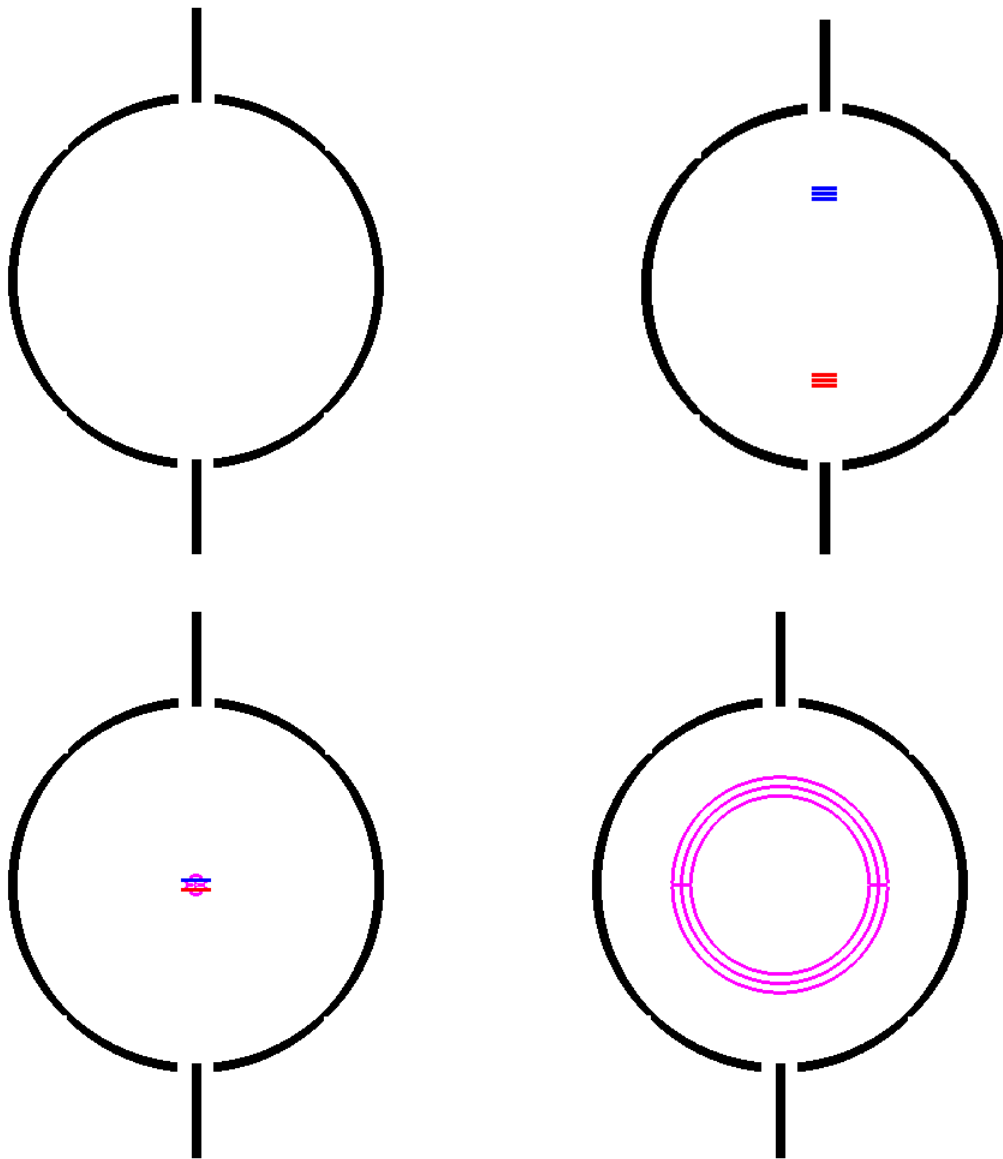
Nous pouvons faire une analogie avec la musique. Le super paquet d'ondes violet représente l'onde sonore unique qui est gravée dans le sillon d'un disque de vinyle et qui est émise par les hauts-parleurs. L'oreille et le cerveau décomposent cette onde en différents instruments,

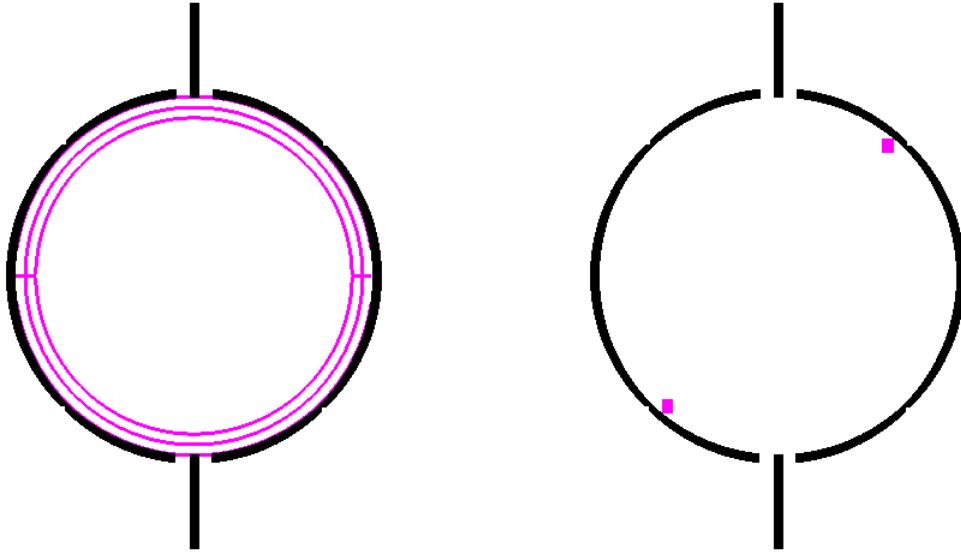
représentés ici par les deux paquets d'ondes noirs. Enfin, un spectromètre peut décomposer le son produit par chaque instrument en ses harmoniques, représentées ici par les ondes de de Broglie.

### Exemple d'enchevêtrement : collision entre deux particules identiques

L'animation qui suit présente une expérience de collision entre deux particules identiques, vue de haut. Nous avons ici deux canons à particules et deux détecteurs de particules semi-circulaires, l'un à gauche et l'autre à droite.

#### Vue de haut



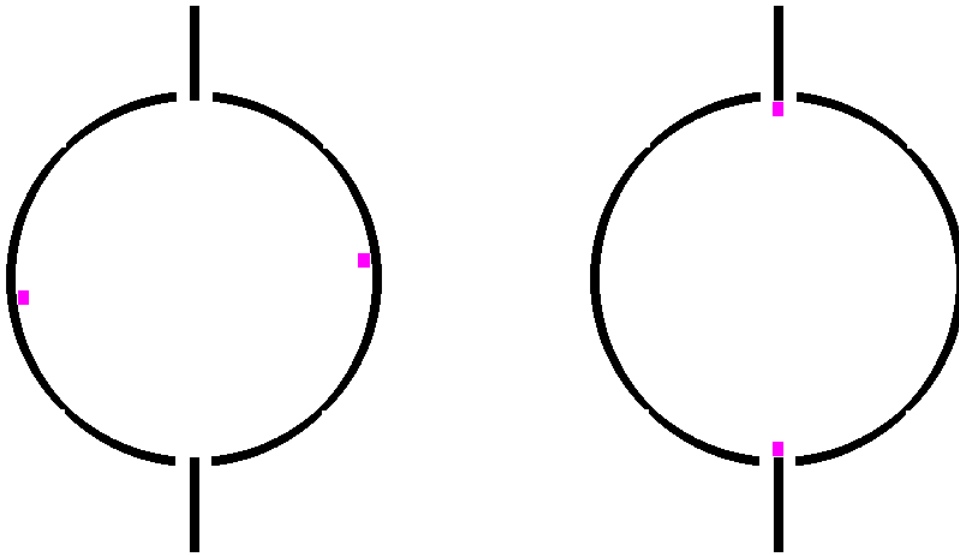


Rappelons que nos animations illustrent le formalisme mathématique, et non les différentes interprétations philosophiques. Chaque canon émet une particule ; chaque particule est représentée par un paquet d'ondes, vu de haut. Au moment de la collision, les deux paquets d'ondes fusionnent en un seul et unique super paquet d'ondes, le système quantique. À partir de ce moment, les particules sont enchevêtrées, ou encore intriquées, inséparables. Les lois de la physique imposent que lors d'une collision, deux particules identiques rebondissent dans des directions opposées. Par ailleurs, en physique quantique, une particule non observée est dans une superposition d'états : ici, chaque particule rebondit dans toutes les directions simultanément ! Le super paquet d'ondes unique incorpore ces deux informations.

Le super paquet d'ondes, qui résulte de la fusion des deux paquets d'ondes initiaux, demeure au repos sur le lieu de l'interaction (au centre de l'enceinte), mais grossit et atteint une taille macroscopique. Lorsqu'il atteint un diamètre égal à celui de l'enceinte, il entre en contact avec les détecteurs semi-circulaires. Il se réduit alors. Puisque ce super paquet d'ondes représente deux particules, et non une seule, ce sont alors deux points d'impact qui apparaissent, plutôt qu'un seul. La réduction du système implique ici trois choses. D'abord, une réduction s'effectue toujours au hasard : chacun des points d'impact peut apparaître n'importe où sur son détecteur, au hasard. Ensuite, la physique des collisions implique que les particules rebondissent dans des directions opposées : les deux points d'impact apparaissent nécessairement dans des directions opposées. Enfin, lorsqu'un système est perturbé par une interaction avec son environnement, par exemple s'il est observé, il est détruit : deux particules apparaissent alors, dans des états corrélés (interdépendants), et, à partir de ce moment, ces particules sont indépendantes l'une de l'autre. Leur enchevêtrement (ou intrication, inséparabilité) est terminé. À partir de ce moment, ce qui arrive à l'une n'a aucune conséquence sur l'autre.

Si l'on refait la même expérience dans les mêmes conditions, tout ce qui survient avant la mesure se déroule de manière identique : le super paquet d'ondes suit alors une évolution unitaire, donc déterministe et régie par l'équation de Schrödinger. Ce n'est qu'au moment de la mesure que le hasard intervient : à chaque fois, les points apparaissent en des endroits différents, mais toujours

diamétralement opposés. Le super paquet d'ondes suit alors une réduction non unitaire, régie par le postulat de réduction de von Neumann et la règle de probabilités de Born.



Nous aurions pu refaire la même expérience avec un seul des détecteurs semi-circulaires, disons le gauche. Le résultat de l'expérience aurait été exactement le même. Cela pourrait se confirmer en utilisant un détecteur droit un peu plus grand que le détecteur gauche. À partir du moment où le premier point d'impact apparaîtrait sur le détecteur gauche, au hasard, le lieu où il apparaît étant imprévisible et incontrôlable, on pourrait prédire avec certitude le lieu où le second point d'impact apparaîtra sur le détecteur droit, un instant plus tard. La connaissance du super paquet d'ondes du système, combinée à la connaissance de l'état final de l'une des particules qui apparaissent au moment de la réduction du système, soit la particule que l'on observe, procure automatiquement et instantanément une connaissance de l'état final de l'autre particule, avant même que l'on observe cette dernière, et même si l'on n'observait pas cette dernière ! Et cela, en raison de l'enchevêtrement des deux particules : elles étaient devenues inséparables, ce qui signifie que leurs états respectifs demeureraient interdépendants, corrélés l'un à l'autre. S'il n'y a pas de détecteur droit, alors au moment exact où un point d'impact apparaît, au hasard, sur le détecteur gauche, une particule localisée (réduite) apparaît du côté droit de l'enceinte, sur le lieu exact où un point d'impact serait apparu sur un détecteur droit, soit dans la direction opposée au point d'impact qui est apparu sur le détecteur gauche. Cette particule, à droite, poursuivrait alors son chemin de manière indépendante de la particule gauche qui a frappé le détecteur gauche.

Autrement dit, dans le cas de particules enchevêtrées, mesurer l'état final d'une seule des particules, qui apparaissent au moment de la réduction du système, est entièrement équivalent à mesurer l'état final du système entier. Puisque les états finaux des particules, qui apparaissent au moment de la réduction d'un système, sont corrélés (inséparables, interdépendants) – puisque l'état final de chacune de ces particules dépend de l'état final de l'autre particule – alors l'état final de chacune de ces particules contient l'information complète sur l'état final du système entier. Au moment où un système est réduit, chacune des « parties » qui apparaissent contient

l'information complète sur le « tout », à l'instar d'un hologramme. Mais cela n'est vrai qu'au moment même de la réduction du système, car à partir de ce moment, les « parties » sont indépendantes les unes des autres et le « tout » n'existe plus.

## **B) La critique EPR**

La critique EPR (Einstein, Podolsky et Rosen) se fonde sur l'interprétation de Copenhague de la physique quantique, appliquée au phénomène d'enchevêtrement de particules.

Selon l'interprétation de Copenhague, les paquets d'ondes ne représentent pas littéralement la réalité. Les particules sont conçues comme des entités manifestant tantôt un comportement de corpuscule (petite bille dure) et tantôt un comportement d'onde. Selon l'interprétation de Copenhague, le paquet d'ondes associé à une particule ne représente pas celle-ci dans son entièreté, mais représente uniquement le point situé en son centre. La particule est délocalisée : le point en son centre se situe partout la fois dans le paquet d'ondes.

Dans le cas d'un système quantique, recourir à un super paquet d'ondes unique pour représenter simultanément les centres de deux particules signifie que, bien que celles-ci demeurent des entités physiquement distinctes, les états et mouvements de leurs centres respectifs deviennent interdépendants, corrélés, inséparables. On en conclut à l'existence d'une communication instantanée, ou encore d'un lien causal instantané, entre ces particules enchevêtrées, et ce, peu importe la distance qui les sépare. Le lien causal entre des particules enchevêtrées n'est aucunement affaibli lorsque la distance entre elles augmente.

Selon l'interprétation de Copenhague, l'état d'une particule non observée est intrinsèquement flou, indéfini. Ainsi en sera-t-il des états de deux particules enchevêtrées non observées, à ceci près que leurs états respectifs, flous, demeurent en tout temps corrélés (interdépendants). Dans le cas de la collision entre deux particules identiques, on doit dire deux choses. Premièrement, la direction dans laquelle chacune des particules rebondit, après la collision, est indéfinie, est un ensemble de possibilités : toutes les directions sont simultanément possibles pour chacune des particules. Deuxièmement, en vertu de la physique des collisions, ces deux ensembles de possibilités sont corrélés (interdépendants) : les directions dans lesquelles les particules rebondissent, bien qu'indéfinies, doivent être opposées. Le super paquet d'ondes du système intègre simultanément ces deux informations : il représente simultanément ces deux ensembles de possibilités corrélés.

Or, toujours selon l'interprétation de Copenhague, observer une particule définit la valeur numérique de la grandeur physique mesurée, que ce soit la position ou la vitesse (la mesure provoque la réduction de la superposition d'états initiale à une valeur numérique unique, à l'intérieur de la marge d'incertitude de l'instrument). Par exemple, mesurer la position d'une particule individuelle provoque la réduction du paquet d'ondes initial à un point, qui peut apparaître n'importe où au hasard, selon la structure du paquet d'ondes initial. Si, maintenant, on mesure la position, non pas d'une particule individuelle, mais d'une particule faisant partie d'un système quantique, donc d'une particule qui est enchevêtrée avec une autre particule, alors cette mesure entraîne deux conséquences simultanées. Premièrement, la position de la particule observée passe de floue à définie (réduction). Deuxièmement, en raison de l'enchevêtrement (de

l'intrication, de l'inséparabilité), la position de l'autre particule doit automatiquement et instantanément passer également de floue à définie (réduction simultanée), même si cette position n'est pas mesurée ! De plus, la position finale de la seconde particule est corrélée à celle de la première particule : les états finaux de ces deux particules sont inséparables, interdépendants, corrélés. Selon l'interprétation de Copenhague du phénomène d'enchevêtrement, deux particules enchevêtrées communiquent entre elles de manière instantanée, ou encore maintiennent entre elles un lien de causalité instantanée. Et ce, peu importe la distance qui les sépare. Lorsque deux particules sont enchevêtrées, agir sur l'une des particules, ici, a automatiquement et instantanément un impact à la fois sur cette particule, ici, et sur l'autre particule, là-bas !

Supposons, dans le cas de la collision entre deux particules identiques, que le dispositif expérimental ne comporte qu'un seul détecteur semi-circulaire, disons le gauche. Dans ce cas, la mesure de la position finale sera effectuée uniquement sur l'une des deux particules, celle de gauche. Mesurer la position d'une particule définit cette position. Le super paquet d'ondes du système est réduit par la mesure : un point d'impact apparaît sur le détecteur gauche, au hasard, et correspond à la position finale de la particule gauche. Mais nous avons affaire à un système quantique de deux particules inséparables : leurs directions respectives après la collision sont inséparables ; plus spécifiquement, elles doivent être opposées. Par conséquent, puisque, après la mesure, la position finale de la particule gauche n'est plus floue mais définie, alors ainsi doit-il en être de la position finale de la particule droite. On en conclut qu'une particule doit automatiquement et instantanément « apparaître » du côté droit du dispositif expérimental, dans la direction opposée au point d'impact qui est apparu sur le détecteur gauche. Selon l'interprétation de Copenhague, observer une particule la matérialise, la fait passer de potentielle (ou virtuelle) à réelle. Lorsque deux particules sont enchevêtrées, observer une seule des deux particules provoque automatiquement et instantanément deux choses : d'une part, la matérialisation de cette particule ; d'autre part, la matérialisation de l'autre particule, même si cette dernière n'est pas observée ! Et ce, peu importe la distance qui sépare les deux particules. Avec, en bonus, le fait que l'état final de la particule non observée est corrélé à celui de la particule observée.

### **Effet EPR et critique EPR**

On dit que la partie de la physique quantique qui porte sur l'enchevêtrement est *non locale*. Cela signifie qu'agir ici, en plus d'avoir un effet ici, a un effet automatique et instantané là-bas, peu importe la distance. La non-localité qui se manifeste lorsqu'un observateur interagit avec un système de particules enchevêtrées est aussi connue sous le nom d'*effet EPR*.

Or, selon la *critique EPR*, soit l'article publié en 1935 par Einstein, Podolsky et Rosen, ce concept de non-localité (cet « effet EPR ») est absurde : si la physique quantique le prédit, c'est qu'elle n'est pas une théorie fondamentale, qu'elle est une théorie incomplète. Il doit exister, dans la réalité, des phénomènes physiques, encore inconnus, qui expliquent de manière *locale* le lien de causalité entre deux particules enchevêtrées, donc sans recourir à cette idée de communication à distance instantanée ou de lien causal instantané. Dans une théorie véritablement complète, ces phénomènes physiques seraient représentés par des variables. Pour le moment, de telles variables n'existent pas dans la théorie : on les qualifie de variables *cachées*. Si ces phénomènes physiques étaient connus, et que ces variables cachées étaient incorporées explicitement à la théorie, alors la

théorie, maintenant complète, ne prédirait plus cette non-localité, cet effet EPR. Une théorie quantique véritablement complète – donc fondamentale – serait *locale*, au même titre que la physique classique : agir ici n'aurait d'effet automatique et instantané qu'ici. Agir ici pourrait toujours avoir un effet là-bas, mais seulement après un certain délai, le temps qu'un signal physique, comme un signal lumineux, franchisse la distance entre ici et là-bas. Et aucun signal physique ne peut voyager plus vite que la lumière. Agir ici ne pourrait jamais avoir d'effet automatique et instantané là-bas.

En 1964, Bell découvre des inégalités mathématiques qui démontrent qu'une théorie quantique locale, fondée sur des variables cachées, comme celle que prônent Einstein, Podolsky et Rosen, *ne peut pas* faire les mêmes prédictions que la mécanique quantique sur les résultats d'expériences. Autrement dit, la mécanique quantique est fondamentalement incompatible avec le concept de localité : elle est nécessairement non locale. Or, étant donné que toutes les prédictions de la mécanique quantique sont confirmées par des expériences, et ce, avec une précision inégalée dans aucune autre discipline scientifique (sauf en relativité restreinte), les inégalités de Bell ont sérieusement remis en question la critique EPR.

### **C) L'expérience d'Alain Aspect**

Le coup fatal porté à la critique EPR vient en 1981. Alain Aspect effectue une expérience sur des photons enchevêtrés et prouve que la non-localité est bel et bien réelle ! La non-localité est *observée* lors d'une expérience ! Aspect *observe* effectivement qu'agir ici, sur un système quantique, en plus d'avoir un effet ici, a un effet automatique et instantané là-bas, peu importe la distance. Ainsi, la mise en évidence, en 1935, de la non-localité que prédit la mécanique quantique lors de mesures effectuées sur des particules enchevêtrées, mise en évidence qui était initialement une critique formulée contre la mécanique quantique, est devenue, au bout du compte, une prédiction extraordinaire confirmée par une preuve extraordinaire !

### **D) L'interprétation naïve de l'effet EPR**

L'interprétation naïve que le conférencier propose jette un regard tout différent sur l'effet EPR, ne voyant dans la non-localité de la physique quantique aucune communication à distance instantanée, ou aucun lien causal instantané.

La description que nous venons de donner de l'effet EPR, qui est la description habituellement employée, repose, comme nous l'avons déjà dit, sur l'interprétation de Copenhague, et non sur le formalisme mathématique de la physique quantique. Cette description supposait que des particules enchevêtrées demeurent des entités physiquement distinctes, mais dont les états et mouvements demeurent inséparables, tant que le système n'est pas perturbé par une interaction avec son environnement, comme une mesure.

Or, ce n'est pas là ce que dit le formalisme mathématique : selon ce dernier, deux particules qui s'enchevêtrent fusionnent en une seule et unique entité, le système, et perdent ainsi leur individualité. Dès lors, il n'existe plus deux mais une seule et unique entité physique, le système. L'interprétation naïve prend le formalisme mathématique au pied de la lettre.

## **Une critique de la description habituelle de l'effet EPR... et de la critique EPR**

Ainsi, selon l'interprétation naïve, les trois grandes idées sur lesquelles se fonde la description habituelle de l'effet EPR, et, par extension, la critique EPR, sont dépourvues de signification. (1) Tout d'abord, parler de « communication à distance instantanée », ou de « lien causal instantané », « entre deux particules enchevêtrées » n'a aucune signification puisqu'il n'existe plus, dans la réalité, qu'une seule et unique entité physique, le système, et non deux particules physiquement distinctes. (2) Ensuite, le concept de « distance qui sépare des particules enchevêtrées » est également dépourvu de signification, pour la même raison, et doit être remplacé par le concept de « diamètre du super paquet d'ondes », ou encore de « diamètre du système ». (3) Enfin, toujours pour la même raison, parce qu'il n'existe plus qu'une seule et unique entité physique, le système, et non deux particules physiquement distinctes, l'idée de « mesure effectuée sur une seule des particules enchevêtrées » perd elle aussi tout son sens. Toute mesure ne peut, en réalité, être effectuée que sur le système entier. Du coup, c'est le système entier qui se réduit lors d'une mesure. Au moment de sa réduction, le système devient deux particules physiquement distinctes. C'est donc uniquement à partir du moment où le système est réduit, par son interaction avec un instrument, que l'on peut parler de deux particules physiquement distinctes. Les états dans lesquels ces particules apparaissent sont alors corrélés, interdépendants, parce que ces deux particules émergent simultanément d'une seule et même entité physique, le système. Les états corrélés de ces deux particules sont déterminés, au moment de la réduction du système unique, simultanément par le hasard, en fonction de l'état du système unique juste avant la mesure. Dès lors, le système unique est détruit : il n'existe plus, il s'est transformé en deux particules physiquement distinctes. Celles-ci sont alors indépendantes : ce qui arrivera à l'une n'aura aucun impact sur l'autre. Il n'y a plus d'enchevêtrement. Cependant, la prise de données (position, vitesse, ...) peut être effectuée uniquement sur l'une des particules qui émergent de la destruction du système.

Ces trois grandes idées sur lesquelles se fonde la description habituelle de l'effet EPR, et, par extension, la critique EPR, n'existent tout simplement pas dans le formalisme mathématique de la physique quantique. Encore une fois, selon ce dernier, lorsque deux particules s'enchevêtrent, elles fusionnent et perdent leur individualité. Il n'existe plus alors qu'une seule et unique entité physique, le système. Il n'existe plus alors qu'un seul et unique super paquet d'ondes. Ces trois grandes idées sont des créations fabriquées par l'interprétation de Copenhague, qui, encore une fois, tente implicitement de concilier deux concepts classiques, ceux de corpuscule et d'état unique, avec les concepts quantiques, ici ceux de superposition d'états, de réduction et d'enchevêtrement. Les concepts de corpuscule et d'état unique n'existent tout simplement pas dans le formalisme mathématique de la physique quantique. Les trois grandes idées de la description habituelle de l'effet EPR et de la critique EPR ne sont pas scientifiques, mais uniquement philosophiques.

À nouveau, Fortier affirme que l'interprétation de Copenhague est erronée, qu'elle est semi-classique, ou encore semi-quantique. Ainsi en est-il, par conséquent, de la description habituelle de l'effet EPR et de la critique EPR, toutes deux fondées sur cette interprétation. À nouveau, Fortier affirme que seule une interprétation naïve, qui prend le formalisme mathématique au sens littéral, est véritablement et entièrement quantique. Contrairement à l'interprétation de



Copenhague, une interprétation naïve ne fait pas intervenir, implicitement ou explicitement, des concepts qui ne se retrouvent pas dans le formalisme mathématique.

### **Une interprétation naïve de l'effet EPR**

L'interprétation naïve doit elle aussi parler de non-localité, étant données les inégalités de Bell de 1964 et la preuve expérimentale obtenue par Aspect en 1981. Mais l'interprétation naïve donne à la non-localité de la physique quantique un sens totalement différent de celui proposé par l'interprétation de Copenhague.

Selon l'interprétation de Copenhague, la non-localité qui se manifeste lors d'une mesure effectuée sur un système est un type de phénomène physique à part : elle est interprétée, encore une fois, comme une communication instantanée, ou encore comme un lien causal instantané, entre des particules physiquement distinctes, peu importe la distance qui les sépare.

Selon l'interprétation naïve, qui ne fait que traduire en mots le formalisme mathématique de la physique quantique, la non-localité est un phénomène physique général, inhérent à l'évolution de tout paquet d'ondes. Et ce, peu importe : (1) qu'il s'agisse d'un paquet d'ondes représentant une particule unique, comme dans l'expérience des fentes de Young, ou d'un super paquet d'ondes représentant un système, comme dans la collision entre deux particules identiques ; (2) qu'il s'agisse d'un paquet d'ondes non observé, suivant une évolution unitaire (évolution déterministe, régie par l'équation de Schrödinger), ou d'un paquet d'ondes observé, suivant une réduction non unitaire (perturbation fondamentale et aléatoire, régie par le postulat de réduction de von Neumann et par la règle de probabilités de Born). Dans tous les cas, l'évolution d'un paquet d'ondes est un phénomène physique qui se déroule simultanément partout dans le paquet d'ondes. Dans tous les cas, tous les points situés à l'intérieur d'un paquet d'ondes sont simultanément affectés lorsque l'état du paquet d'ondes change. Et ce, indépendamment des distances qui séparent ces points, donc, indépendamment de la taille du paquet d'ondes, celle-ci pouvant être microscopique ou macroscopique.

Selon l'interprétation naïve, la non-localité qui se manifeste lors d'une mesure effectuée sur un système n'a donc *rien de spécifique* : elle n'est rien de plus qu'un cas particulier de la non-localité qui se manifeste de manière générale lors de l'évolution de n'importe quel paquet d'ondes.

Il existe une différence – et une seule – entre la réduction d'un système et celle d'une particule unique. Dans le cas d'un système, on obtient plusieurs particules se trouvant dans des états réduits et corrélés ; dans le cas d'une particule unique, on obtient une seule particule se trouvant dans un état réduit.

### **L'interprétation naïve de la collision entre deux particules identiques**

Que dit l'interprétation naïve au sujet d'une collision entre deux particules identiques ? L'interprétation naïve ne fera ici que traduire en mots l'animation présentée plus haut, étant donné que cette animation, comme toutes les autres présentées dans cette conférence, illustre tel quel le formalisme mathématique.

Selon l'interprétation naïve, au moment de la collision, les deux particules fusionnent en une entité physique unique, le système. À partir du moment de la collision, les particules perdent leur individualité : il n'existe plus deux mais une et une seule entité physique, le système. Le concept de distance entre des particules enchevêtrées (2<sup>e</sup> des trois grandes idées de la description habituelle de l'effet EPR) perd tout son sens et doit être remplacé par le concept de diamètre du système. Le système demeurera au repos sur le lieu de la collision, au centre de l'enceinte, et gonflera, jusqu'à atteindre une taille macroscopique, jusqu'à devenir aussi grand que l'enceinte elle-même. Tant qu'il n'est pas observé, le système suit une évolution unitaire (déterministe et régie par l'équation de Schrödinger). Cette évolution est non locale : tous les points situés à l'intérieur du super paquet d'ondes sont simultanément affectés alors que celui-ci gonfle. Et ce, indépendamment des distances qui séparent ces points, donc indépendamment de la taille du super paquet d'ondes, celle-ci passant de microscopique à macroscopique dans l'animation. L'évolution unitaire d'un paquet d'ondes est un phénomène physique qui se déroule simultanément partout dans le paquet d'ondes.

Supposons que notre dispositif expérimental ne comporte qu'un seul détecteur semi-circulaire, le gauche. Étant donné que, selon l'interprétation naïve, il n'existe plus physiquement qu'une seule entité, le système, dire que la mesure sera effectuée uniquement sur la particule gauche (3<sup>e</sup> des trois grandes idées de la description habituelle de l'effet EPR) perd tout son sens. Même avec un seul détecteur semi-circulaire, la mesure est effectuée sur le système entier, car c'est avec le super paquet d'ondes entier, et unique, que le détecteur semi-circulaire gauche interagira.

L'interaction du système avec le détecteur provoque la réduction non unitaire du système. On peut à nouveau faire appel à l'analogie de la bulle de savon : le système, telle une bulle de savon, est fragile. Lorsqu'une bulle de savon touche un mur – ou un détecteur – elle éclate. Dans le cas où la bulle de savon représente un système de deux particules enchevêtrées, plutôt qu'une particule unique, on doit supposer que deux fragments, plutôt qu'un seul, subsistent. Ces deux fragments peuvent être n'importe quelles parties de la bulle initiale, au hasard, à la condition qu'ils se trouvent dans des directions opposées (corrélation, ou interdépendance, entre les états des particules qui apparaissent au moment de la réduction du système). Et ce, en raison des lois de la physique des collisions.

La réduction non unitaire du système est elle aussi non locale : tous les points situés à l'intérieur du super paquet d'ondes sont simultanément affectés alors que celui-ci est réduit. Et ce, indépendamment des distances qui séparent ces points, donc indépendamment de la taille du super paquet d'ondes, taille qui est ici macroscopique. La réduction non unitaire d'un paquet d'ondes est un phénomène physique qui se déroule simultanément partout dans le paquet d'ondes. Ainsi, même si le dispositif expérimental ne comporte qu'un seul détecteur semi-circulaire, le gauche, la mesure affecte le système unique dans son entièreté et provoque l'apparition simultanée de deux particules diamétralement opposées.

Si ces deux particules se retrouvent alors dans des états corrélés, interdépendants (ici : dans des positions diamétralement opposées), ce n'est certainement pas parce qu'elles auraient communiqué entre elles de manière instantanée, ou encore parce qu'elles auraient maintenu entre elles un lien de causalité instantanée (1<sup>re</sup> des trois grandes idées de la description habituelle de

l'effet EPR), étant donné que, avant la mesure, ces deux particules n'existaient pas ! Il n'existait alors qu'une seule et unique entité physique, le système. Si les états des particules, qui apparaissent au moment de la réduction du système, sont corrélés, c'est parce que ces particules émergent simultanément de la même entité physique, le système. Il s'agit de deux « fragments » d'une seule et même « bulle de savon initiale ». Si les états de ces particules sont corrélés, c'est parce qu'ils sont déterminés de manière simultanée par un seul et même processus physique, non local, celui de la réduction du système unique (celui de « l'éclatement de la bulle de savon initiale »). Ces états corrélés sont déterminés simultanément au hasard, à partir de l'état global dans lequel se trouve le système unique juste avant la mesure. Étant donné que la réduction d'un système est un phénomène non local, ces états seront corrélés peu importe le diamètre du système au moment de sa réduction, et donc peu importe la distance qui sépare les particules au moment où elles apparaissent.

Au moment où le système est réduit, par une interaction avec son environnement, comme une mesure, il est détruit. À partir du moment où les deux particules apparaissent, dans des états corrélés, celles-ci sont indépendantes l'une de l'autre. Ce qui arrivera à l'une n'aura alors aucune conséquence pour l'autre. Le concept de « distance entre des particules » prend alors une signification physique, mais il n'y a plus d'enchevêtrement. Encore une fois, selon l'interprétation naïve, il n'y a jamais de communication instantanée, ou de lien causal instantané, entre deux particules physiquement distinctes, peu importe la distance qui les sépare.

### **E) Trois questions soulevées par l'effet EPR**

La description habituelle de l'effet EPR, fondée sur l'interprétation de Copenhague, soulève trois grandes questions. (1) L'effet EPR est-il une infraction à la théorie de la relativité restreinte ? Vient-il remettre celle-ci en question ? (2) L'effet EPR permettrait-il à des humains de communiquer à distance de manière instantanée ? (3) L'effet EPR permettrait-il à des humains d'agir à distance de manière instantanée ? La réponse à ces trois questions est négative, et ce, autant si l'on place du point de vue de l'interprétation de Copenhague que de l'interprétation naïve.

Tout d'abord, selon la théorie de la relativité restreinte, rien ne peut se déplacer plus rapidement que la lumière. Or, la non-localité de la physique quantique, qu'elle soit conçue selon l'interprétation de Copenhague (un phénomène à part, l'effet EPR, qui se rapporte aux systèmes de particules enchevêtrées) ou selon l'interprétation naïve (un phénomène général qui se rapporte à l'évolution de tout paquet d'ondes, que ce paquet d'ondes représente une particule unique ou un système, qu'il s'agisse d'une évolution unitaire ou d'une réduction non unitaire), la non-localité de la physique quantique, donc, implique que *quelque chose* voyage instantanément entre différents points de l'espace, donc à une vitesse infinie. Mais il faut préciser que le « rien » dont parle la relativité restreinte désigne la matière et l'énergie. Or, la non-localité de la physique quantique n'implique aucun déplacement de matière ni d'énergie : c'est l'information relative aux états quantiques qui voyage à une vitesse infinie. Il n'y a donc aucune contradiction entre la non-localité de la physique quantique et la relativité restreinte. La relativité restreinte est une théorie valide uniquement à l'échelle macroscopique de la réalité : elle ne prend pas en charge les états quantiques, objets de la non-localité. Selon l'interprétation de Copenhague, c'est l'information relative aux états quantiques de deux particules physiquement distinctes qui est

échangée, de manière instantanée, entre celles-ci lorsqu'elles sont enchevêtrées. Cela a pour conséquence que leurs états quantiques respectifs demeurent en tout temps corrélés. Selon l'interprétation naïve, c'est l'information relative à l'état quantique d'un paquet d'ondes unique, dans sa globalité, qui, à chaque instant de son évolution, est transmise instantanément à tous les points de celui-ci. Ce qui a pour conséquence que l'évolution d'un paquet d'ondes est un phénomène physique qui se déroule simultanément partout dans le paquet d'ondes

Ensuite, certains soulèvent la possibilité que l'effet EPR permettrait à un émetteur et un récepteur de communiquer instantanément, peu importe la distance qui les sépare. Cette idée est fondée sur la description habituelle de l'effet EPR, donc sur l'interprétation de Copenhague. L'émetteur ferait interagir deux particules afin qu'elles s'enchevêtrent. Il en conserverait une à proximité et enverrait la seconde sur le lieu du récepteur. À partir du moment où la seconde particule atteindrait sa destination, l'émetteur effectuerait des mesures sur la première particule, ici, afin de provoquer la réduction de son état. L'effet EPR implique que l'état de la seconde particule, là-bas, serait automatiquement et instantanément réduit, et que son état final serait corrélé à l'état final de la première particule. Si l'émetteur et le récepteur s'étaient au préalable entendus sur un code qui associerait une signification à chaque état quantique, alors en agissant sur la particule qu'il a conservée ici, l'émetteur transmettrait instantanément de l'information au récepteur là-bas, peu importe la distance. Finis les délais de communication dus au temps qu'un signal prend pour voyager du lieu d'émission au lieu de réception !

Enfin, toujours en se fondant sur la description habituelle de l'effet EPR, donc sur l'interprétation de Copenhague, certains soulèvent la possibilité que l'effet EPR permettrait d'agir à distance de manière instantanée. L'idée est la même que pour la communication à distance instantanée, à cette différence que la particule distante servirait, plutôt qu'à communiquer, à provoquer des événements, par exemple à contrôler une machine. La particule que l'émetteur conserverait à proximité, ici, deviendrait une télécommande quantique dont l'effet à distance serait instantané, peu importe cette distance !

Malheureusement, la non-localité de la physique quantique ne permet ni la communication ni l'action à distance instantanées, et ce, pour deux raisons.

Selon l'interprétation de Copenhague, la première raison est que lorsque l'émetteur, ici, effectue une mesure sur la particule qu'il a conservée, l'état final de cette particule, après réduction, est toujours déterminé par le hasard. Il est physiquement impossible à l'émetteur de prédire et de contrôler cet état final. Tout ce qu'il peut prédire, c'est l'ensemble des états finaux possibles et les probabilités d'obtenir chacun. Par conséquent, puisque l'état final de la seconde particule, là-bas, après réduction, est corrélé à celui de la première particule, ici, alors il est physiquement impossible à l'émetteur de prédire et de contrôler l'état final de la seconde particule, là-bas, et donc de lui faire faire ce qu'il désire.

Selon l'interprétation naïve, la première explication est différente. Les concepts de «particule ici» et de «particule là-bas» sont dépourvus de signification, puisque des particules enchevêtrées ont perdu leur individualité. Une seule et unique entité physique existe, le système. L'idée de contrôler de manière instantanée ce que fait une particule là-bas en agissant sur une particule ici est par conséquent dépourvue de signification. Cette idée doit être remplacée par

l'idée de contrôler simultanément ce que *feront* deux particules, l'une ici et l'autre là-bas, en agissant sur le système quantique unique qu'elles ont formé en s'enchevêtrant, afin de provoquer la réduction de ce système de faire apparaître ces particules, dans des états corrélés. Le diamètre du système doit être égal à la distance qui sépare l'émetteur du lieu où se trouve le récepteur ou l'événement que l'on désire déclencher à distance. Lorsque l'émetteur effectue sa mesure, c'est le système entier qui est affecté et qui se réduit : deux particules apparaissent alors, dont les états sont corrélés. Mais, encore une fois, toute réduction est aléatoire : c'est le hasard qui détermine les états corrélés de ces deux particules. Il est physiquement impossible à l'émetteur de prédire et de contrôler ce que seront ces états corrélés, et donc de faire faire à ces deux particules ce qu'il désire.

La seconde raison est la même que l'on se place du point de vue de l'interprétation de Copenhague ou de l'interprétation naïve. Dès qu'une mesure est effectuée sur un système quantique, les deux particules que l'on retrouve, après réduction, dans des états corrélés, sont indépendantes l'une de l'autre. Ce qui arrive alors à l'une n'a aucune conséquence pour l'autre. Il n'y a plus d'enchevêtrement. L'enchevêtrement entre des particules – leur intrication, leur inséparabilité – ne persiste que tant que le système ainsi formé n'est pas perturbé par son environnement. Toute interaction entre le système et son environnement, comme une mesure, détruit le système et met fin à l'enchevêtrement.

## 8) La décohérence

Nous avons vu qu'en 1932, von Neumann a postulé le phénomène de la réduction, qui se manifeste lors d'une mesure, sans proposer de mécanisme physique pour l'expliquer. Depuis 1970, une théorie visant à décrire et expliquer un tel mécanisme physique se développe : la théorie de la décohérence.

La théorie de la décohérence se fonde sur l'idée que la physique quantique est une physique universelle, c'est-à-dire que tous les objets de la réalité, qu'ils soient macroscopiques ou microscopiques, sont fondamentalement des objets quantiques. Cette idée est validée notamment par le fait que si l'on applique la physique quantique aux objets macroscopiques, ses équations se ramènent à celles de la physique classique. Tout objet, macroscopique comme microscopique, peut donc être représenté par un paquet d'ondes.

Lorsqu'une mesure est effectuée sur une particule ou sur un système de particules enchevêtrées, le paquet d'ondes qui représente cette particule ou ce système et *le paquet d'ondes qui représente l'instrument* se chevauchent et se superposent. Ils fusionnent alors en un super paquet d'ondes unique, le système quantique unique « instrument-objet ».

De plus, l'instrument étant un objet macroscopique, il est continuellement en interaction avec les particules de son environnement : molécules d'air, photons (particules de lumière), etc. Ainsi, le super paquet d'ondes du système « instrument-objet » et les paquets d'ondes des particules de l'environnement se chevauchent et se superposent. Tous ces paquets d'ondes fusionnent alors en

un seul et unique nouveau super paquet d'ondes, qui correspond à un super système quantique unique « instrument-objet-environnement ».

Si l'on applique l'équation de Schrödinger à ce nouveau super paquet d'ondes, celle-ci prédit que ce super système « instrument-objet-environnement » se réduit spontanément, qu'il passe naturellement, de lui-même, d'une superposition d'états initiale à un état final unique, au hasard. La réduction d'un super système quantique est une conséquence nécessaire de l'équation de Schrödinger. Plus spécifiquement, ce sont les interactions internes à ce super système unique « instrument-objet-environnement » qui sont la cause physique de cette réduction, soient les interactions innombrables et incontrôlables entre le sous-système « instrument-objet » et les particules de l'environnement.

Le terme « décohérence » désigne la transition spontanée, effectuée par le super système « instrument-objet-environnement », d'une superposition d'états initiale à un état final unique. Le terme « décohérence » peut être considéré comme synonyme de « réduction ».

La décohérence est un phénomène non local : il s'agit d'un phénomène physique qui se déroule simultanément partout dans le super système « instrument-objet-environnement ». Tous les points situés à l'intérieur du super paquet d'ondes sont simultanément affectés lorsque l'état de ce super paquet d'ondes est réduit. Et ce, indépendamment des distances qui séparent ces points, donc, indépendamment de la taille du super paquet d'ondes, taille qui est ici macroscopique.

### **Un seul et unique type d'évolution en physique quantique**

La théorie de la décohérence unifie les deux types d'évolution de la physique quantique.

Rappelons qu'un paquet d'ondes non observé suit une « évolution unitaire », déterministe et régie par l'équation de Schrödinger. Dans ce cas, le hasard ne se manifeste pas. Le postulat de réduction de von Neumann et la règle de probabilités de Born ne s'appliquent pas. Par ailleurs, un paquet d'ondes observé suit une « réduction non unitaire », régie par le postulat de réduction de von Neumann et la règle de probabilités de Born. C'est uniquement lors d'une réduction non unitaire que le hasard se manifeste. Dans ce cas, c'est l'équation de Schrödinger qui ne s'applique pas ; du moins, c'est ce que l'on croyait avant 1970, avant la naissance de la théorie de la décohérence.

Comme nous venons de le voir, selon la théorie de la décohérence, le mécanisme physique qui est la cause de la réduction non unitaire (les interactions internes au super système « instrument-objet-environnement ») est régi par l'équation de Schrödinger. Du coup, la réduction non unitaire devient un cas particulier d'évolution unitaire. Du coup, il n'existe plus qu'un seul et unique type d'évolution en physique quantique, l'évolution unitaire, régie par l'équation de Schrödinger.

### **Décohérence et hasard**

Qu'advient-il du hasard avec la théorie de la décohérence ? La réponse est subtile. Le fait qu'un super système quantique « instrument-objet-environnement » se réduise spontanément est déterministe et régi par l'équation de Schrödinger. Mais ce que l'équation de Schrödinger ne

permet pas d'expliquer, du moins pour le moment, c'est le choix de l'état final unique qui subsiste après la réduction. Cet état final unique peut être n'importe lequel des états de la superposition initiale, au hasard. L'équation de Schrödinger n'explique pas pourquoi c'est tel état qui subsiste après la réduction plutôt que tel autre. Autrement dit, le fait qu'une transition spontanée, « naturelle », ait lieu, dans un super système quantique, entre une superposition d'états initiale et un état final unique est déterministe et expliqué par l'équation de Schrödinger. Mais le résultat de cette transition est aléatoire et n'est pas expliqué par l'équation de Schrödinger. On peut faire une analogie : lorsqu'on lance un dé sur une table, le fait qu'une transition spontanée, « naturelle », ait lieu entre la virevolte initiale du dé et son arrêt final sur la table est déterministe, mais le résultat de cette transition, la face finale que présente le dé, est aléatoire. Ainsi, le hasard conserve sa place dans la théorie de la décohérence.

Tous les mystères de la réduction n'ont pas encore été élucidés. La théorie de la décohérence est toujours une théorie en développement, un objet de recherche.

## **9) Le hasard en physique quantique**

Rappelons d'abord que la conception répandue du hasard, selon laquelle il signifierait que n'importe quoi peut survenir, est erronée : le hasard est en soi une forme de déterminisme, de nature statistique. Le hasard signifie que, bien que le résultat d'une mesure est imprévisible et incontrôlable, l'ensemble des résultats possibles ainsi que les probabilités d'obtenir chacun sont rigoureusement déterminés par des lois mathématiques. Et ce, de manière analogue au résultat que l'on obtient en lançant un dé. En physique quantique, l'ensemble des résultats possibles et les probabilités d'obtenir chacun sont rigoureusement déterminés par le paquet d'ondes, son spectre d'ondes de de Broglie et la règle de Born.

Souvenons-nous ensuite qu'il est courant de dire que « la physique quantique est aléatoire », ou encore « indéterministe ». Nous sommes maintenant en mesure d'apprécier en quoi cet énoncé est erroné. Nous pouvons formuler notre critique en deux arguments.

### **Argument no 1 : le hasard ne joue pas un rôle central en physique quantique**

D'une part, ce n'est que dans le phénomène de réduction non unitaire (décohérence) que le hasard se manifeste. Selon le formalisme mathématique de la physique quantique, une particule ou un système de particules enchevêtrées, lorsque non observé, suit une évolution unitaire, donc évolue d'une manière entièrement déterministe. Dans une expérience de physique quantique donnée, l'évolution avant la mesure d'une particule ou d'un système se déroule toujours de la même manière, comme nos animations nous l'ont montré.

D'autre part, tout n'est pas aléatoire dans le phénomène de réduction non unitaire. Lorsqu'une particule ou un système de particules enchevêtrées est observé, le fait qu'il y ait réduction est en soi déterministe, selon la théorie de la décohérence. Le hasard ne se manifeste qu'au niveau du choix de l'état final unique qui subsiste après la réduction.

Ainsi, globalement, la physique quantique est déterministe au même titre que la physique classique. Il n'y a qu'une seule exception au déterminisme en physique quantique : le choix de l'état unique qui subsiste après une réduction.

## **Argument no 2 : la nature du hasard en physique quantique n'est pas élucidée**

La question de la nature du hasard, qui se manifeste lors d'une réduction, n'a toujours pas été tranchée. Ce hasard est-il bel et bien réel ? Y a-t-il quelque chose de fondamentalement aléatoire dans la réalité ? Ou y aurait-il un mécanisme *entièrement déterministe* à l'œuvre dans le phénomène de réduction, qui expliquerait de manière déterministe le choix de l'état final ? Dans ce dernier cas, le hasard auquel la théorie quantique fait appel ne serait pas réel, mais représenterait ou bien notre ignorance partielle de ce mécanisme déterministe (la théorie de la décohérence étant toujours un objet de recherche), ou bien notre incapacité à effectuer de manière exacte tous les calculs complexes qu'un tel mécanisme impliquerait, et ce, à l'instar du lancer d'un dé.

Analysons le lancer d'un dé. La face sur laquelle un dé tombe est le résultat d'un mécanisme entièrement déterministe : aucun hasard réel n'est à l'œuvre ici ! Le hasard auquel on fait appel lorsqu'on lance un dé ne fait que représenter notre incapacité à effectuer de manière exacte tous les calculs complexes que le lancer d'un dé implique. Il faudrait en effet tenir compte de l'angle exact selon lequel le dé est lancé, de sa hauteur initiale exacte, de la force exacte avec laquelle il est lancé, de la température et de la densité de l'air, du taux d'humidité, de toutes les turbulences atmosphériques engendrées par les objets et personnes sur place, de la présence de particules en suspension dans l'air, etc.

Le lancer d'un dé relève de la théorie du chaos. Cette théorie, malgré ce qu'on peut souvent entendre à son sujet, n'est pas une théorie de l'indéterminisme, mais une théorie du déterminisme lorsqu'il y a sensibilité aux conditions initiales. Dans le cas du lancer d'un dé, cela signifie que le mécanisme physique qui est à l'œuvre, d'une part dans le passage de la virevolte du dé à son arrêt, et d'autre part dans le choix de la face finale qu'il présente, est entièrement déterministe, mais que de toutes petites modifications aux conditions initiales (angle, hauteur, force, turbulences, ...) changent l'issue du processus. La métaphore de l'effet papillon illustre ce phénomène de sensibilité aux conditions initiales : le battement d'ailes d'un papillon à l'autre bout du monde peut finir par engendrer ici, de fil en aiguille, des turbulences atmosphériques qui influencent le résultat du lancer du dé.

Il est impossible d'effectuer de manière exacte tous les calculs complexes que le lancer d'un dé implique pour deux raisons. (1) Tout instrument de mesure étant imparfait, il est impossible de mesurer avec une précision parfaite les conditions initiales (angle, hauteur, force, turbulences...). Or, tout écart, aussi petit soit-il, entre les données employées dans les calculs et la réalité aura pour conséquence que les prédictions obtenues par calculs seront différentes des résultats effectivement obtenus dans la réalité. Et ce, précisément en raison de la sensibilité aux conditions initiales : de petites modifications aux conditions initiales changent l'issue du processus. (2) Le nombre de variables dont il faudrait tenir compte est si grand qu'il est impossible d'effectuer des calculs de manière exhaustive. On ne peut qu'effectuer des calculs approximatifs. Et, encore une fois en raison de la sensibilité aux conditions initiales, le fait de ne pas tenir compte, dans les



calculs, de toutes les variables impliquées de manière exhaustive aura pour conséquence que les prédictions obtenues par calculs seront différentes des résultats effectivement obtenus dans la réalité.

La météo est un autre exemple de système chaotique. Un mécanisme complexe et déterministe est à l'œuvre, avec sensibilité aux conditions initiales. Il est impossible d'effectuer de manière exacte tous les calculs complexes que ce mécanisme implique, pour les deux mêmes raisons que dans le lancer d'un dé. C'est pourquoi les prévisions météo, à l'instar des prédictions concernant le lancer d'un dé, sont formulées en termes de probabilités. Dans les deux cas, aucun hasard réel n'est à l'œuvre. Dans les deux cas, le hasard n'est pas ontologique (il ne relève pas de la réalité, celle-ci étant entièrement déterministe), mais épistémologique (il relève de la connaissance que nous pouvons avoir de la réalité : il traduit le caractère partiel et imparfait de cette connaissance).

## **Résumé de l'argument no 2**

Bref, la physique quantique ne se prononce pas, pour le moment, sur la nature du hasard auquel elle fait appel. Trois hypothèses sont possibles. (1) Le hasard en physique quantique est-il réel ? Est-il ontologique ? (2) Le hasard en physique quantique est-il épistémologique, traduisant notre ignorance partielle d'un mécanisme entièrement déterministe, dont la théorie de la décohérence ne nous fournirait qu'une connaissance pour le moment partielle ? Dans ce cas, le hasard qui se manifeste lors du phénomène de réduction ne serait pas réel. Lorsque ce mécanisme déterministe sera complètement élucidé, le hasard sera évacué de la physique quantique. (3) Le hasard en physique quantique est-il épistémologique, mais traduisant plutôt la sensibilité aux conditions initiales d'un mécanisme déterministe complexe, dont la théorie de la décohérence nous donnerait peut-être alors une connaissance déjà complète ? Dans ce dernier cas, le hasard qui se manifeste lors du phénomène de réduction ne serait pas réel, mais relèverait de la théorie du chaos, à l'instar du hasard qui se manifeste dans le lancer d'un dé et dans les prévisions météo. Le hasard ne serait alors jamais évacué de la physique quantique, pour les mêmes raisons qu'il ne sera jamais évacué du jeu de dés ou de la météo.

## **À venir**

Lors de la deuxième partie de sa conférence, Daniel Fortier résumera les points abordés ce soir sur le formalisme mathématique de la physique quantique. Il reviendra sur l'interprétation de Copenhague et sur l'interprétation naïve, et présentera quatre autres interprétations philosophiques de la physique quantique : l'interprétation statistique (ou d'ensemble ; Einstein), l'interprétation des univers parallèles (Everett ; DeWitt), l'interprétation par la conscience (Wigner ; Penrose) et la position instrumentaliste (Dirac ; Feynman).

Notons que le conférencier prépare un livre sur le sujet de la physique quantique, basé sur les deux parties de sa conférence, lequel sera accompagné d'un CD-ROM portant les animations présentées ce soir.

## Période de questions

Une personne de l'assistance présente une analogie entre l'effet de l'observateur en physique quantique, envisagé du point de vue de l'interprétation de Copenhague, et l'effet de l'observateur en sciences humaines. Il compare la mesure effectuée sur une particule à la question qu'un sondeur nous pose sur ce que sera notre vote à la prochaine élection. Avant que le sondeur ne nous questionne, il se peut que notre opinion ne soit pas clairement définie, qu'elle soit floue, qu'elle soit un ensemble de possibilités au sens où on appuie simultanément plusieurs candidats. Le fait que le sondeur nous pose la question nous force alors à répondre : cela nous force à « réduire notre ensemble de possibilités » à un choix unique, et ainsi à définir notre opinion. On prend une décision au moment où la question nous est posée.

Daniel Fortier croit que c'est là une excellente métaphore pour illustrer l'interprétation de Copenhague. Toutefois, si l'on adopte l'interprétation naïve, on perd cette idée que l'état d'une particule non observée est indéfini et que celui d'une particule observée est défini. Selon l'interprétation naïve, un « électeur quantique » peut effectivement avoir « une superposition d'opinions », chacune étant clairement définie. Par exemple, cet électeur quantique peut appuyer tel candidat pour telle raison, *et* tel autre pour telle autre raison, etc.

La question que pose le sondeur ne force pas alors cet électeur quantique à faire un choix et à définir son opinion. C'est plutôt le fait que le sondeur *demande une réponse unique* (à l'instar d'un instrument de mesure qui, étant macroscopique et relevant de la physique classique, ne peut se trouver que dans des états uniques) qui perturbe de manière fondamentale l'opinion de l'électeur quantique et provoque la « réduction » de la superposition d'opinions initiale à une opinion finale unique.

Plusieurs échanges ont été faits sur l'effet EPR, notamment sur la possibilité d'agir à distance. Le contenu de ces discussions a été incorporé au résumé de la conférence afin d'assurer une continuité dans la lecture du présent document.

Enfin, on s'interroge sur la nécessité d'utiliser la physique quantique pour décrire tous les comportements possibles des particules microscopiques. Par exemple, les instruments utilisés pour mesurer les masses d'atomes et de molécules, notamment pour la datation radioactive, fonctionnent selon les lois de la physique classique : on ne recourt pas aux lois de la physique quantique lorsqu'on les utilise.

Comment sait-on si le recours à la physique quantique est indispensable pour décrire le comportement d'une particule, ou si la physique classique peut être employée ? Lorsque les quantités avec lesquelles on travaille, comme les distances parcourues par les particules à l'intérieur de l'instrument, sont beaucoup plus grandes que la constante de Planck, qui intervient dans la relation de Heisenberg et qui a une valeur de l'ordre de  $10^{-34} \text{ m}^2 \cdot \text{kg} / \text{s}$ , on peut traiter les particules comme des corpuscules (petites billes dures) ayant un comportement classique.

Dans de telles situations, l'incertitude de l'instrument qui mesure la position est plus grande que la largeur du paquet d'ondes, et l'incertitude de l'instrument qui mesure la vitesse est plus grande

que la largeur du spectre de vitesses (spectre des ondes de de Broglie). Dans de telles situations, les effets spécifiquement quantiques, comme ceux qui découlent de la relation de Heisenberg lors d'une mesure, sont négligeables car inférieurs à la précision des instruments de mesure. Dans de telles situations, la physique classique procure une description valide du comportement des particules.

**À suivre...**

**Compte-rendu préparé par Anne-Sophie Charest, revu et développé par Daniel Fortier.**