

Physique pour tous

Cours 10 : Mécanique Quantique III

Antoine Tilloy *†

Résumé

Notes¹ du troisième cours de mécanique quantique. On y donne des compléments de mécanique ondulatoire et aborde l'épineuse question des interprétations.

1 Rappels

On a vu au cours précédent que la mécanique quantique était une théorie physique assez originale dans la mesure où elle est uniquement un outil permettant de faire des prédictions sans a priori sur ce qui constitue le monde. L'objet fondamental de la théorie est donné par le premier postulat. À chaque particule est associée une *fonction d'onde* qui est un *champ* dont la valeur en chaque point de l'espace est reliée à la probabilité d'y mesurer la particule. Le statut ontologique de ce champ n'est pas précisé par la théorie, autrement dit on ne sait pas si la fonction d'onde *existe vraiment* ou si c'est uniquement un outil épistémologique. Ce champ fluctue, évolue au cours du temps et c'est le deuxième postulat qui fixe sa dynamique via l'équation de Schrödinger. Cette équation est *déterministe*. Si on connaît à un instant donné la valeur de la fonction d'onde en chaque point de l'espace, on sait prédire sa valeur à tout instant ultérieur (tant qu'on ne fait pas de mesure). Le dernier postulat, qu'on appelle souvent le postulat de la mesure, dit à quoi sert la fonction d'onde et précise son évolution lors d'une mesure. La valeur du module carré de la fonction d'onde en un point de l'espace donne la densité de probabilité de trouver la particule en cet endroit *si on réalise effectivement une mesure*. Lorsque l'on réalise une mesure de la position de la particule, on trouve ainsi un point aléatoire dont on ne connaît que la distribution statistique. Le dernier postulat stipule enfin qu'à l'issue de la mesure, la fonction d'onde se concentre entièrement et de manière brutale sur le point qui a été mesuré, i.e. le champ devient nul en tout point de l'espace sauf exactement à l'endroit où l'on vient de trouver la particule². Même si cette dernière prescription peut paraître surprenante, on a vu qu'elle était nécessaire pour qu'une succession de deux mesures rapprochées donnent un résultat cohérent.

2 Compléments de mécanique ondulatoire

Avant d'aborder les questions d'interprétation, il faut donner quelques applications de la théorie quantique dans sa version «mécanique ondulatoire» afin de se forger une petite intuition de ce qui se passe.

2.1 Énergie, quantification

L'objectif de ce paragraphe est d'expliquer de manière relativement peu rigoureuse pourquoi le formalisme de la mécanique ondulatoire a pour conséquence la *quantification*,

*Laboratoire de Physique Théorique, École Normale Supérieure, Paris

†contact : tilloy@lpt.ens.fr

1. Dernière modification : 8 janvier 2016

2. Rappelons qu'après la mesure, la fonction d'onde qui vient de se concentrer s'étale ensuite petit à petit avec l'équation de Schrödinger

c'est à dire le fait que dans beaucoup de situations, les niveaux d'énergie accessibles à une particule sont discrets et non continus. Rappelons l'équations de Schrödinger :

$$i\hbar \frac{\partial \psi(t, x)}{\partial t} = \underbrace{-\frac{\hbar^2}{2m} \frac{\partial^2 \psi(t, x)}{\partial x^2}}_{\simeq \text{Énergie cinétique}} + \underbrace{V(x)\psi(t, x)}_{\simeq \text{Énergie potentielle}} \quad (1)$$

$\underbrace{\phantom{-\frac{\hbar^2}{2m} \frac{\partial^2 \psi(t, x)}{\partial x^2} + V(x)\psi(t, x)}}$
= Énergie totale de la particule

Afin de rendre l'interprétation du terme de droite un peu plus précise et le relier plus rigoureusement à l'énergie totale, il est nécessaire d'introduire un nouveau concept.

Définition 1 (Hamiltonien). On appelle Hamiltonien l'opérateur³ qui à une fonction d'onde associe le terme de droite de l'équation de Schrödinger et son interprétation heuristique en terme d'énergie :

$$H : \psi \mapsto H(\psi)$$

avec :

$$H(\psi)(x, t) = -\frac{\hbar^2}{2m} \frac{\partial^2 \psi(t, x)}{\partial x^2} + V(x)\psi(t, x)$$

Attention, le Hamiltonien de ψ est toujours une fonction, i.e. un champ qui prend une valeur (complexe) en chaque point de l'espace temps, ça n'est pas a priori une fonction constante ou un simple multiple de ψ . Le Hamiltonien est relié à l'énergie totale de la manière suivante :

Définition 2 (Énergie). Une particule de fonction d'onde ψ a une énergie totale E si le Hamiltonien de sa fonction d'onde est égal à E fois la fonction d'onde.

$$H(\psi) = E \cdot \psi$$

Ici E n'est plus un opérateur, c'est simplement un nombre. En général, l'énergie d'une particule est une quantité mal définie car le Hamiltonien n'est tout simplement pas un multiple de la fonction d'onde. Cette situation est générale en mécanique quantique : de même que la position d'une particule n'est correctement définie que lorsque la fonction d'onde est piquée sur un x donné, la plupart des quantités que l'on peut définir classiquement ne sont définies précisément que pour une sous classe de fonctions d'onde.

Théorème (Décomposition en fonctions propres). *On peut toujours écrire une fonction d'onde ψ comme une somme (éventuellement infinie) de fonctions d'onde ψ_n ayant une énergie E_n bien définie. C'est à dire :*

$$\psi = \psi_1 + \psi_2 + \dots + \psi_n$$

avec :

$$H(\psi_n) = E_n \cdot \psi_n$$

Ce théorème donne une nouvelle illustration du principe de superposition et on comprend mieux a posteriori pourquoi l'énergie d'une particule n'était pas une quantité bien définie en général. En effet, supposons que l'on ait deux fonctions d'onde ayant chacune une énergie bien définie mais différente, alors la somme (normalisée) de ces deux fonctions d'onde est toujours une fonction d'onde acceptable d'après le principe de superposition. L'énergie de cette nouvelle fonction d'onde ne peut pas être bien définie car elle est la superposition de deux fonctions d'onde d'énergie différentes, elle a en quelque sorte deux énergies *en même temps*. Le précédent théorème est en quelque sorte la réciproque de cette construction : une fonction d'onde dont l'énergie n'est pas définie est forcément une superposition d'états d'énergie différentes bien définies. C'est une première motivation pour chercher en premier dans un problème les fonctions d'onde dont l'énergie est bien définie car on pourra toujours écrire les autres comme une somme de celles-là. Une autre

3. Un opérateur est une fonction qui à une fonction associe une autre fonction. Un exemple typique est la dérivation qui associe par exemple à la fonction $f : x \mapsto x^2$ la fonction $g : x \mapsto 2x$.

motivation est d'ordre mathématique. Lorsqu'une fonction d'onde a une énergie bien définie E , alors l'équation de Schrödinger devient une équation différentielle ordinaire très simple que l'on sait résoudre exactement :

$$i\hbar \frac{\partial \psi(t, x)}{\partial t} = E \cdot \psi(x, t)$$

Ce qui se résout en :

$$\psi(x, t) = e^{-iEt/\hbar} \psi(x, 0)$$

Ainsi la fonction d'onde à n'importe quel instant a une expression très simple par rapport à la fonction d'onde initiale : il s'agit juste d'une multiplication par un nombre *indépendant* du point de l'espace. Plus important, la densité de probabilité de la fonction d'onde est alors indépendante du temps car le module carré fait disparaître l'exponentielle complexe⁴ de sorte que la densité de probabilité de trouver la particule en un point est indépendante du temps ! Autrement dit, si on mesure la position d'une particule dont l'énergie est bien définie, alors la statistique des résultats de mesure ne dépend pas du temps (même si la fonction d'onde, elle, dépend quand même du temps de manière simple). Si l'énergie d'une particule était toujours bien définie, alors il n'y aurait en fait jamais de dynamique !

On peut maintenant récapituler. L'énergie d'une particule est une notion qui n'est pas toujours bien définie, néanmoins on s'intéresse souvent au sous ensemble des fonctions d'onde dont l'énergie est bien définie. On le fait pour deux raisons : tout d'abord parce que *l'on a le droit* dans la mesure où toute fonction d'onde s'écrit comme une somme de fonctions d'onde dont l'énergie est bien définie, mais aussi parce que c'est *pratique* dans la mesure où la dynamique d'une fonction d'onde d'énergie fixée est presque triviale. Pour connaître la dynamique d'une fonction d'onde quelconque on l'a décompose ainsi en fonctions d'onde d'énergie bien définie dont l'évolution est facile à calculer puis on ajoute les solutions.

Remarque 1 (Conservation de l'énergie). Pour une fonction d'onde d'énergie bien définie, l'énergie est fixe et donc ne dépend pas du temps. L'énergie se conserve, comme en mécanique classique (on n'a pas encore abandonné la conservation de l'énergie en physique). Pour une fonction d'onde dont l'énergie n'est pas bien définie, on peut tout de même la décomposer en une somme de fonctions d'onde dont l'énergie est bien définie. C'est alors l'énergie moyenne⁵ de la fonction d'onde initiale qui se conserve.

Remarque 2 (Évolution). On vient de voir qu'un état d'énergie bien définie n'évoluait pas, ou plutôt que la statistique des résultats de mesure que l'on pouvait faire sur lui ne dépendait pas du temps. Tout état peut s'écrire comme une somme d'états d'énergie bien définie, on pourrait donc penser naïvement que rien ne dépend du temps en mécanique quantique. En réalité il n'en est rien. Considérons l'exemple d'une fonction d'onde ψ somme de deux fonctions d'onde ψ_1 et ψ_2 d'énergies bien définies E_1 et E_2 . On résout l'équation de Schrödinger pour ψ_1 et ψ_2 en fonction de leur valeur initiale :

$$\begin{aligned}\psi_1(x, t) &= e^{-iE_1 t/\hbar} \psi_1(x, 0) \\ \psi_2(x, t) &= e^{-iE_2 t/\hbar} \psi_2(x, 0)\end{aligned}$$

Si $\psi = \psi_1 + \psi_2$ on a alors :

$$\psi(x, t) = e^{-iE_1 t/\hbar} \psi_1(x, 0) + e^{-iE_2 t/\hbar} \psi_2(x, 0)$$

On suppose pour simplifier que $\psi_1(x, 0)$ et $\psi_2(x, 0)$ sont réels. Quand on prend le module

4. Pour ceux qui ne maîtrisent pas bien les nombres complexes, il faut juste noter que pour une fonction d'onde ayant une énergie bien définie, on a $|\psi(x, t)|^2 = |\psi(x, 0)|^2$.

5. Ce que l'on entend ici par moyenne peut se définir plus correctement, il s'agit de la somme des énergies pondérées par l'intégrale du module carré de la fonction d'onde (non normalisée) correspondante dans la décomposition de la fonction d'onde initiale.

carré on obtient :

$$\begin{aligned} |\psi(x, t)|^2 &= |\psi_1(x, 0)|^2 + |\psi_2(x, 0)|^2 + 2 \cos\left(\frac{(E_2 - E_1)}{\hbar}t\right) \psi_1(x, 0)\psi_2(x, 0) \\ &= |\psi(x, 0)|^2 + \underbrace{2 \left(\cos\left(\frac{(E_2 - E_1)}{\hbar}t\right) - 1 \right) \psi_1(x, 0)\psi_2(x, 0)}_{\neq 0} \end{aligned}$$

Ainsi la statistique des résultats de mesure effectuée sur une particule dont l'énergie n'est pas bien définie *fluctue* au cours du temps (autrement dit la particule «bouge») : la dynamique n'est heureusement pas toujours triviale en mécanique quantique !

Théorème (Quantification). *Soit une particule d'énergie bien définie évoluant dans un potentiel V qui confine sa position⁶. Alors l'énergie de la particule ne peut prendre que des valeurs discrètes qui dépendent du potentiel V considéré.*

Il s'agit d'un théorème qui se démontre avec un raisonnement assez avancé d'analyse spectrale. On peut simplement préciser qu'il est la conséquence directe de la forme particulière de l'équation de Schrödinger, c'est donc un corollaire logique du postulat 2 et de notre définition de l'énergie. On arrive ainsi enfin à l'origine du nom de la mécanique quantique : l'énergie est quantifiée. Même si l'objet fondamental de la théorie est quelque chose de continu –la fonction d'onde– les énergies accessibles sont général discrètes.

Exemple 1 (Niveaux d'énergie discrets dans un puits). *On considère une bille lâchée dans une cuvette parabolique et on étudie d'abord la situation classique. Si on la lâche en haut de la cuvette avec une énergie cinétique nulle, la bille descend, accélère, puis atteint le fond et remonte en ralentissant. L'énergie mécanique totale de la bille, somme de son énergie cinétique et de son énergie potentielle de pesanteur se conserve. Classiquement, on peut choisir de manière continue l'énergie mécanique (ou totale) de la bille en la lâchant plus ou moins haut dans la cuvette. Ce que dit le théorème précédent c'est qu'en mécanique quantique (et donc typiquement dans le cas d'une particule dans une cuvette de potentiel) la situation n'est pas tout à fait analogue et les énergies accessibles sont discrètes. Mieux, les états d'énergie bien déterminée sont stationnaires, i.e. le module carré de leur fonction d'onde ne dépend pas du temps (voir Fig. 1). En mécanique il existe une configuration particulièrement triviale : si je pose la bille au fond de la cuvette et sans vitesse initiale, alors elle reste fixe, elle est à son minimum d'énergie. En mécanique quantique il existe aussi un niveau d'énergie minimale (voir Fig. 2), mais la fonction d'onde associée à cette énergie est très différente du cas classique. En effet elle n'est pas concentrée entièrement sur le fond de la cuvette et possède une certaine largeur. Par conséquent, si on mesure la particule, on n'est pas certain de la trouver rigoureusement au fond, on va même de temps en temps la trouver relativement loin du point que l'on attendrait usuellement. Classiquement, quand un système est à son énergie minimale il ne peut plus fluctuer, il est figé (comme une bille coincée sans mouvement au fond d'une cuvette). En mécanique quantique ça n'est pas le cas et la position d'une particule à son minimum d'énergie est encore indéterminée ce qui donne lieu à des fluctuations irréductibles que l'on appelle parfois fluctuations de point zéro.*

Exemple 2 (Retour sur l'atome d'hydrogène). *Le théorème précédent permet de revenir sur l'atome d'hydrogène que l'on avait évoqué au cours précédent. On avait vu que l'équivalent des trajectoires classiques ou orbites étaient des fonctions d'onde d'énergie bien définies, les orbitales. On comprend désormais pourquoi elles sont en nombre discret. On comprend aussi pourquoi l'électron dans son orbitale d'énergie la plus faible n'est pas collé au noyau, la fonction d'onde a une certaine extension spatiale. Dans cette configuration, l'électron ne peut pas perdre d'énergie et s'écraser sur le noyau car son énergie est minimale, la quantification l'empêche de s'effondrer.*

6. On entend ici par «confinant» un potentiel qui empêche la particule de s'échapper à l'infini. Typiquement un électron dans un atome est confiné par le potentiel électrique du noyau, de même qu'une bille dans une cuvette est confinée par le potentiel gravitationnel. Un skieur descendant une pente de neige rigoureusement infinie n'est *pas* confiné car sa position x prend classiquement des valeurs de plus en plus grandes.

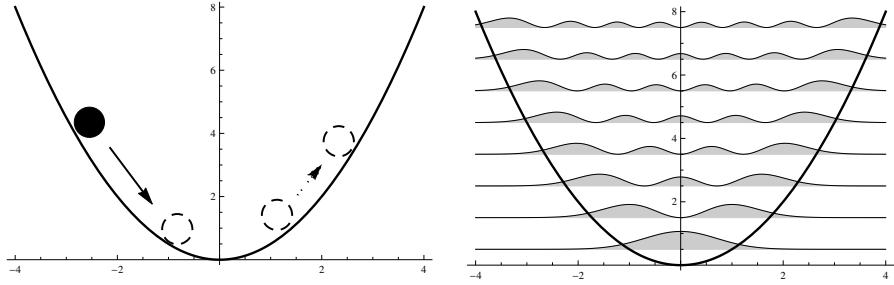


FIGURE 1 – Énergie : comparaison entre le cas classique à gauche où l'énergie mécanique dépend de la hauteur à laquelle la bille (macroscopique) a été lâchée et qui peut prendre des valeurs continues et le cas quantique à droit où la fonction d'onde de la particule ne peut avoir des énergies (bien définies) que discrètes.

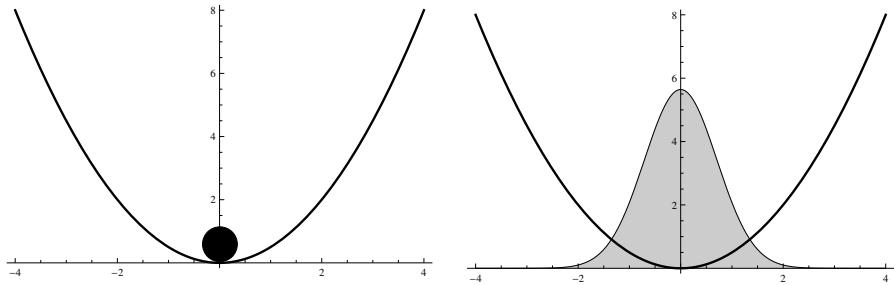


FIGURE 2 – Fondamental : Comparaison de l'état de plus basse énergie dans le cas classique à gauche et dans le cas quantique à droite. Dans le cas quantique, la bille la particule a une certaine probabilité de ne pas être mesurée au fond de la cuvette.

2.2 Effet tunnel

Un effet intéressant en mécanique quantique est la capacité qu'a une particule à traverser une barrière qui serait classiquement impénétrable. Rappelons d'abord la situation classique avant d'en donner la modification quantique. On fait rouler une bille en ligne droite sur une surface sans frottements. On suppose que la bille rencontre ensuite une bosse mais que sa vitesse initiale est trop faible pour qu'elle la franchisse (voir Fig. 3) (son énergie cinétique initiale est plus faible que l'énergie potentielle qu'elle aurait en haut de la bosse). La bille monte alors un peu sur la bosse puis redescend et revient en arrière, on dit qu'elle a rebondi ou, pour faire une analogie avec la lumière, qu'elle a été réfléchie. On peut maintenant considérer la situation quantique. On considère que la bille est ponctuelle et décrite par une fonction d'onde. On suppose que le paquet d'onde de la particule avance vers la bosse, bosse qui est incluse dans l'équation de Schrödinger via l'énergie potentielle de pesanteur $V(x)$ qu'elle donne à la particule lorsque cette dernière monte dessus. On suppose que l'énergie cinétique de la particule est inférieure au potentiel V au sommet de la bosse. On peut alors résoudre l'équation de Schrödinger pour savoir ce qui va se passer lorsque la particule rencontre l'obstacle (voir Fig. 4). On observe que le gros de la fonction d'onde repart en arrière mais qu'une petite partie traverse tout de même la barrière, situation interdite classiquement. Si on mesure la position de la particule, on a une probabilité non nulle de la mesurer de l'autre côté de la barrière. On répétant l'expérience (constituée de l'évolution et de la mesure) un nombre important de fois, on va trouver un certain pourcentage de particules qui ont traversé la barrière alors que l'on devrait classiquement en trouver exactement 0.

Remarque 3 (Conservation de l'énergie violée?). À première vue, pour que la particule traverse la barrière il faut que son énergie totale ait à un moment été supérieure à l'énergie potentielle au sommet de la barrière. On a ainsi l'impression que la conservation de l'énergie a été violée et a permis à la particule de passer. En fait, on peut tout de

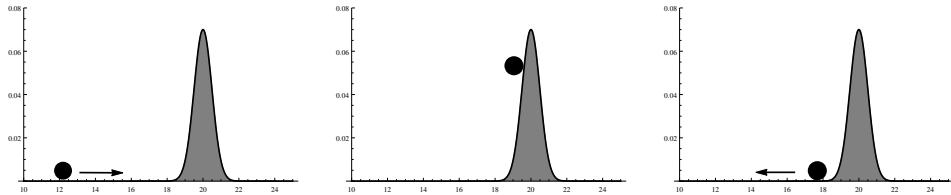


FIGURE 3 – Bille envoyée contre une bosse. Si l'énergie cinétique de la bille n'est pas suffisante, elle monte un peu sur l'obstacle puis repart en arrière. On peut répéter l'expérience un nombre de fois arbitrairement grand, jamais la bille ne passera l'obstacle si son énergie cinétique initiale n'est pas suffisante, c'est à dire au moins égale à l'énergie potentielle que la bille aurait au sommet.

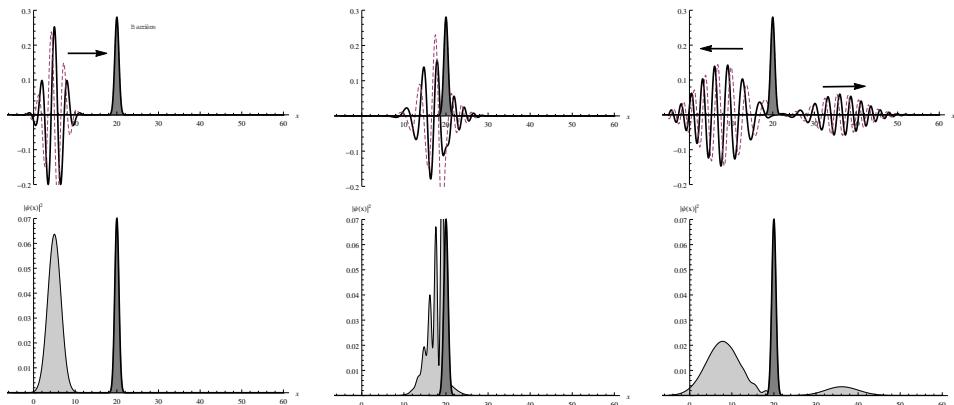


FIGURE 4 – Particule envoyée contre une barrière de potentiel. La première ligne représente la fonction d'onde de la particule (partie réelle en traits pleins, partie imaginaire en pointillés). La deuxième ligne représente le module carré de la fonction d'onde, et donc la probabilité de mesurer la particule. On observe qu'une partie de la fonction d'onde traverse la barrière : la particule a une certaine probabilité de se trouver de l'autre côté si on la mesure. Ce dessin n'est pas une simple vue de l'esprit, il est obtenu par résolution numérique de l'équation de Schrödinger avec *Mathematica*.

même sauver ce principe ici en notant que l'énergie de la particule n'est pas bien définie pendant la traversée de la barrière : la fonction d'onde a des morceaux avant la barrière et des morceaux après qui permettent à son énergie totale de rester faible en moyenne et en tout cas inférieure à celle du sommet. L'image classique que l'on donne pour essayer de se représenter cette situation si bizarre est que la particule passe en quelque sorte sous la barrière, comme si elle avait creusé un tunnel, d'où le nom d'*effet tunnel* qui est donné à cette manifestation surprenante de la mécanique quantique.

La probabilité de traverser un mur décroît exponentiellement avec son épaisseur et sa hauteur⁷. Ainsi même en courant très vite vers un mur en béton, on a en pratique très peu de chances de réussir à le traverser par effet tunnel quantique. L'effet tunnel est très visible aux échelles atomiques mais devient vite négligeable à mesure que l'on dézoomé vers le monde macroscopique où on retrouve la physique à laquelle on est habitué.

2.3 Limite classique

La mécanique quantique semble très singulière par rapport à la mécanique classique et on peut se demander pourquoi la mécanique classique marche finalement si bien à notre échelle. De même que la mécanique classique est une approximation de la relativité restreinte dans la limite de vitesses faibles devant celle de la lumière, on aimerait comprendre dans quel mesure la mécanique classique est une approximation de la mécanique quantique. Il existe de très nombreuses réponses, plus ou moins fines, à cette question⁸. On en propose ici la version la plus simple qui est le théorème d'Ehrenfest⁹. Donnons tout d'abord une définition.

Définition 3 (Position moyenne). On appelle position moyenne d'une particule à un temps t , notée $\langle x \rangle_t$ la moyenne des positions x auxquelles on pourrait la mesurer au temps t . Elle est ainsi obtenue en sommant toutes les positions possibles pondérées par leur probabilité, c'est à dire le module carré de la fonction d'onde. Ainsi plus formellement :

$$\langle x \rangle_t = \int_{-\infty}^{+\infty} x |\psi(x, t)|^2 dx$$

Définition 4 (Moyenne d'une fonction de la position). La définition précédente s'étend à toute fonction de la position $f(x)$. On a alors :

$$\langle f(x) \rangle_t = \int_{-\infty}^{+\infty} f(x) |\psi(x, t)|^2 dx$$

Théorème (Ehrenfest). *La position moyenne de la particule obéit à l'équation suivante :*

$$m \frac{d^2 \langle x \rangle_t}{dt^2} = \langle F(x) \rangle_t$$

Où $F(x)$ est la force qui s'applique au point x , c'est à dire plus formellement moins la dérivée du potentiel V , i.e. $F(x) = -V'(x)$.

Ce théorème se démontre en utilisant l'équation de Schrödinger et la définition de la moyenne que l'on vient de donner. Dans la limite où la fonction d'onde d'une particule est très piquée, sa position est bien définie et vaut sa position moyenne, l'équation précédente devient ainsi simplement la deuxième loi de Newton ! Quand les fonctions d'onde

7. Il s'agit de la «hauteur» du mur en énergie potentielle. Pour un mur «standard», typiquement un bâtiment, cela correspondrait au potentiel électrique crée par les électrons de ses atomes.

8. La théorie la plus communément acceptée pour expliquer (ou plutôt suggérer) l'émergence du classique à notre échelle à partir du quantique à l'échelle microscopique est la théorie de la décohérence. Sa présentation sort du cadre de ce cours mais il faut préciser que le mot *théorie* ne veut pas dire qu'il s'agit d'une extension ou d'une complétion de la mécanique quantique, la décohérence est une simple conséquence des axiomes fondamentaux. La question de savoir si cette théorie règle tout est encore discutée et est l'objet de vive controverses.

9. Paul Ehrenfest, 1880-1933, physicien autrichien. S'il était un physicien relativement peu connu, à part pour ce théorème, ses élèves ont influencé profondément la physique du XX^e siècle.

sont suffisamment peu étallées, on retrouve approximativement la mécanique classique et ses trajectoires. Ce théorème justifie *a posteriori* en partie la forme de l'équation de Schrödinger : si elle était fondamentalement différente, on ne retrouverait pas la deuxième loi de Newton de manière approximative.

Notons que dans le cas général (si la fonction d'onde n'est pas piquée), la valeur moyenne de la position ne vérifie *pas* la deuxième loi de Newton. En effet, il faut noter que l'on prend dans le terme de droite la valeur moyenne de la force et pas la force associée à la valeur moyenne. Pour une force et une fonction d'onde quelconques, on ne peut pas faire rentrer la moyenne sans changer la valeur du terme de droite : $\langle F(x) \rangle_t \neq F(\langle x \rangle_t)$.

3 Les problèmes philosophiques de la mécanique quantique

3.1 Problème de l'intuition

Le premier problème de la théorie quantique est celui de l'intuition. Dans la mesure où elle ne parle pas de la réalité (que cette dernière existe ou pas) il est difficile de se créer une intuition qui ne soit pas que mathématique ou algorithmique (dans le sens d'une procédure à appliquer, de la répétition d'un cycle évolution-mesure). Le formalisme lui-même ne donne pas directement de piste (aucune interprétation n'est contenue dans les axiomes, il n'y a qu'une procédure) de sorte que l'interprétation de la théorie quantique est forcément extérieure à la mécanique quantique et est une autre théorie. Cette dernière a pour contrainte d'être compatible avec le contenu prédictif et si possible d'offrir un meilleur support pour l'intuition que les 3 postulats standards.

3.2 Problème de la mesure

Il existe au sein de la mécanique quantique un problème d'interprétation ou une légère imprécision du formalisme qui peuvent poser de réels problèmes en pratique. La difficulté fondamentale posée par le formalisme de la théorie quantique est qu'il sépare de manière obligatoire l'observateur (qui s'occupe de la mesure et du troisième postulat) de la nature qu'il observe (dont la dynamique est donnée par le deuxième postulat) sans spécifier précisément où se situe la limite entre les deux. La mécanique quantique admet que l'observateur est *classique* ce qui est en général vu comme un synonyme de *macroscopique* : les mesures qu'il fait sont bien définies et ne peuvent être dans un état superposé. Il est impossible de faire de la mécanique quantique sans observateur et donc en particulier de mettre les observateurs à l'intérieur du système étudié. La seule solution dans ce cas est d'ajouter un nouvel observateur qui observe le premier observateur intégré au système. On peut ensuite faire une chaîne plus ou moins longue de ce type où on intègre l'appareil de mesure au système, puis l'appareil de mesure qui le mesure etc. jusqu'à ce qu'on considère qu'on est allé assez loin. Cette procédure est ainsi relativement bien définie en pratique, pour l'expérimentateur, mais son statut théorique apparaît bien flou. Les pères fondateurs de la mécanique quantique pensaient qu'il n'y avait pas de problème, même théorique, dans la mesure où les résultats ne dépendaient pas du moment où s'arrêtait la chaîne de mesure (dite aussi chaîne de Von Neumann) mais il se trouve que ça n'est pas le cas.

On aimeraient au fond pouvoir décrire le système {appareil de mesure + particule à mesurer} avec une équation de Schrödinger pour l'ensemble et observer que l'on obtient de manière effective une mesure. Le problème c'est que cela ne fonctionne pas [2] et que l'ensemble reste superposé comme la particule initiale, on n'obtient jamais de «collapse» réel : on ne peut pas dériver exactement le postulat 3 du postulat 2. Il faut par conséquent accepter cette séparation un peu bizarre en un monde quantique microscopique décrit par l'équation de Schrödinger et un monde macroscopique essentiellement classique dans lequel vivent les appareils de mesure et les observateurs. La limite entre les deux n'est pas spécifiée par la théorie, le problème de la mesure est ainsi un peu le problème de la séparation entre micro et macro, entre classique et quantique. C'est aussi le problème

de l'émergence de quantités bien déterminées à l'échelle macroscopique à partir d'un monde microscopique essentiellement flou. C'est ce qu'on appelle le «*macro objectification problem*» dont un cas particulier est le problème du chat de Schrödinger.

4 La jungle des interprétations/extensions

Une excellente référence pour les interprétations est le livre de Frank Laloë [4].

4.1 Classification

4.1.1 Réalisme/opérationnalisme

Les axiomes fondamentaux de la théorie quantique en font plus une métathéorie donnant un cadre que toutes les théories physiques doivent a priori respecter qu'une théorie décrivant directement la nature. Il s'agit ainsi d'une théorie générale de la prédiction plus que d'une théorie physique. Pour reprendre le vocabulaire de Bell, tous les raisonnements en mécanique quantique sont faits sur des observables, c'est à dire sur ce que l'on peut dire ou connaître du monde, et pas sur des *beables* (étrables ?), c'est à dire sur des éléments de réalité préexistants. La théorie quantique ne dit pas qu'il n'existe pas de réalité, simplement elle n'en parle pas. Elle possède cependant à première vue tout ce qu'il faut pour faire de la physique en fournissant pour chaque situation les probabilités exactes de réalisation d'événements. En ce sens c'est une bonne théorie scientifique car elle fait des prédictions falsifiables. Tant que l'on s'en tient à cet aspect prédictif pur, la théorie quantique ne contient pas de paradoxes, c'est quand on essaie de plaquer une réalité sous-jacente à cette théorie que l'on arrive éventuellement à des contradictions. Comprendre que l'on pouvait *prédirer sans décrire* a constitué la révolution principale de la théorie quantique dans un contexte où prédire avait justement l'air paradoxalement plus simple que décrire. Trouver qu'une théorie physique peut se contenter de prédire sans décrire et ne poser des questions que sur les résultats de mesure, c'est adopter un point de vue *opérationnaliste*¹⁰ (comme Bohr, Heisenberg, Pauli), penser qu'il faut au contraire chercher à compléter la théorie par une ontologie, c'est à dire une description de ce qui se passe indépendamment de l'observation, c'est adopter un point de vue *réaliste* (comme Einstein, de Broglie).

4.1.2 Psi-ontic/Psi-epistemic

Un autre critère qui permet de classifier les interprétations de la mécanique quantique est le statut qu'elles accordent à la fonction d'onde (l'état de la particule). Si on pense que la fonction d'onde est un champ qui *existe vraiment*, un élément de la réalité *objective*, qu'en plus d'être l'objet fondamental de la théorie prédictive elle est aussi l'objet fondamental (ou un des objets fondamentaux) de la nature, alors on adopte un point de vue *psi-ontic*¹¹. Si on pense au contraire que la fonction d'onde n'est qu'un outil permettant de faire des prédictions, qui contient plus l'état de notre connaissance subjective de la nature que la nature elle-même, alors on adopte un point de vue *psi-epistemic*. S'il existe un débat c'est que la fonction d'onde n'appartient de manière claire à aucune de ces deux catégories et qu'il existe d'assez bons arguments pour défendre les deux points de vue.

L'argument fort des psi-ontic, ce sont les interférences. On a du mal à imaginer que le vecteur d'état ne soit que le reflet de notre connaissance du monde et que pourtant, il interfère avec lui-même pour produire des figures éventuellement complexes et non intuitives. Plus généralement, c'est le second postulat d'évolution unitaire qui fait penser aux psi-ontic que le vecteur d'état d'un système quantique a bien une réalité physique parce qu'il évolue à la manière d'un champ.

10. On dit parfois aussi *positiviste* mais le terme est tellement connoté philosophiquement et son acceptation est tellement large que je préfère utiliser le terme *opérationnaliste* qui est moins équivoque.

11. Cela signifie que l'on accorde un caractère ontologique à la fonction d'onde ψ . J'ignore s'il existe un équivalent français.

L'argument fort des psi-epistemic, c'est le postulat de la mesure et en particulier la règle du collapse du paquet d'onde. Si l'étalement de la fonction d'onde représente notre ignorance de la position exacte de la particule, on comprend assez bien qu'à l'issue de la mesure, l'incertitude étant levée, la fonction d'onde se concentre en un point. Le postulat 3 est ainsi difficile à expliquer pour les psi-ontic.

Parmi les physiciens qui travaillent sur les fondations de la mécanique quantique, on retrouve un continuum d'attitudes possibles vis à vis du vecteur d'état même celles qui sont a priori incohérentes (voir [7, 5] pour un panorama). On peut être réaliste et psi-epistemic dans ce cas on pense simplement qu'il existe une réalité mais que cette dernière n'est pas dans la fonction d'onde (et éventuellement dans une réalité plus fine que l'on ignore), on peut aussi être réaliste et psi-ontic, dans ce cas la réalité est simplement dans la fonction d'onde. On peut être psi-epistemic et opérationnaliste, attitude naturelle si on considère qu'il n'est pas nécessaire de considérer la réalité (qu'elle existe ou pas) et qu'elle n'est en tout cas pas contenue dans la fonction d'onde. On peut enfin être opérationnaliste et psi-ontic en un sens faible (sans quoi les deux points de vue seraient contradictoires) et c'est un peu le point de vu orthodoxe de l'interprétation de Copenhague. Pour les défenseurs de cette interprétation, il ne faut pas parler de la réalité mais uniquement de ce qui est observable. Tout ce que l'on peut dire de la réalité est contenu dans la fonction d'onde et il n'y a même rien d'autre, au fond ce que les gens appellent naïvement réalité n'est que ce que l'on peut en connaître. «Tout» est dans la fonction d'onde et ainsi, même s'il n'y a pas vraiment de réalité, la fonction d'onde reste ce qui en est finalement le plus proche et acquiert donc un statut quasi ontologique. C'est pour cela que l'interprétation de Copenhague, bien qu'opérationnaliste, peut être aussi classée parmi les théories psi-ontic.

Même si cette question peut sembler purement philosophique, des progrès récents ont été faits en 2012 par Pusey, Barrett et Rudolph [6]. Ces derniers ont démontré que les modèles «psi-epistemic» *raisonnables* étaient incompatibles avec l'expérience. Ce qu'il y a dans le «raisonnable» est un peu technique et le théorème ne montre pas de manière stricte le caractère ontologique de la fonction d'onde. Simplement, le prix à payer pour être «psi-epistemic» devient très élevé : il devient nécessaire d'accepter une forme de rétrocausalité, c'est à dire que les causes peuvent se propager du futur vers le passé.

4.1.3 Romantisme

Un dernier critère de classification plus anecdotique est du à Bell¹². L'idée est de savoir si la vision que donne une théorie du monde est plutôt romantique, c'est à dire, dans l'esprit de Bell, un peu ésotérique, volontairement mystique, ou excessivement poétique. Dans l'esprit de Bell, le romantisme, du moins dans ce contexte, est une caractéristique évidemment péjorative¹³. Il s'agit d'un concept qui peut, à juste titre, sembler assez vaguement défini mais on verra qu'il est assez facile de classer une interprétation comme romantique ou non en pratique.

4.2 Interprétations réalistes

4.2.1 Mondes multiples à la Everett

L'interprétation des mondes multiples est sans conteste la plus populaire, du moins dans le grand public. C'est aussi celle qu'adoptent de nombreux physiciens, un peu hon-

12. John Stewart Bell, 1928-1990, physicien américain. Fervent défenseur du réalisme et notamment de l'interprétation de de Broglie-Bohm, il a démontré l'inégalité qui porte son nom et qui impose des contraintes très fortes aux théories réalistes, donnant ainsi paradoxalement des armes aux opérationnalistes.

13. Attention, cela ne signifie pas qu'il est mal qu'une théorie ait des conséquences qui puissent sembler poétiques. Simplement il peut sembler souhaitable que l'interprétation elle-même soit formalisée dans un langage aussi précis et peu poétique que possible. L'objectif de Bell était d'épurer la mécanique quantique de son romantisme inutile pour que l'on soit certain que ce qui reste de bizarrerie et de poésie soit vraiment la poésie de la nature et pas la poésie de notre formalisme pour la décrire. Cette approche a été fructueuse car elle a permis à Bell de démontrer que la seule caractéristique un peu mystique irréductible (c'est à dire indépendante de l'interprétation) de la mécanique quantique était la non-localité.

teux, dans le secret de leur esprit.

L'idée d'Everett pour régler le problème de la mesure est de dire que le *collapse* n'arrive jamais. La fonction d'onde décrit un ensemble d'univers possibles. À chaque mesure, l'univers se sépare en un nombre de mondes égal aux nombre de résultats de mesure. Tous les résultats de mesure arrivent simultanément, on vit simplement dans un monde qui a donné un des résultats. Il n'y a plus que la fonction d'onde et un univers qui se sépare à chaque instant en de multiples branches, ces branches ne peuvent pas être virtuelles, il faut qu'elles existent vraiment pour que l'interprétation soit cohérente. À la différence des probabilités classiques dans lesquelles un événement arrive *ou* n'arrive pas, l'existence de plusieurs univers permet de donner une ontologie au principe de superposition : pour Everett plusieurs réalités peuvent exister simultanément.

Dans l'expérience des fentes d'Young, il y existe une infinité de trajectoires possibles pour la particule, passant par l'un ou l'autre des trous pour arriver en un point donné de l'écran. Pour une réalisation donnée de l'expérience, on observe un unique impact sur l'écran dans «notre» monde mais toutes les autres possibilités ont existé, il existe une autre version de moi qui a vu un autre résultat.

La théorie des mondes multiples est réaliste, psi-ontic (la fonction d'onde est réelle, ou en tout cas objective) et très romantique (ce qui explique paradoxalement son succès). Cette interprétation est bizarrement assez soutenue en pratique malgré sa formalisation vague de sorte qu'il est parfois difficile de savoir ce qu'elle dit vraiment. La multiplication exponentielle du nombre d'univers en fonction du temps semble aussi assez peu parcimonieuse. Malgré ces défauts (a priori rédhibitoires) cette interprétation est assez courante car elle donne une bon support à l'intuition en rendant «réel» le principe de superposition. C'est en général celle qui est utilisée implicitement lorsque l'on vulgarise la mécanique quantique sans en introduire le formalisme («le chat est à la fois mort et vivant»).

Cette approche est surtout défendue par les physiciens faisant de la Cosmologie, contexte dans lequel le formalisme standard apparaît absurde (qu'est ce que «mesurer» signifie quand on regarde l'univers dans son ensemble?). Comme «Many-Worlds» utilise exactement les mathématiques de l'approche orthodoxe, elle est bien tolérée (malgré ce qu'elle a de choquant) et est défendue sans gêne par des grands noms comme Steven Weinberg (prix Nobel qui a contribué à l'élaboration du modèle standard), Viatcheslav Mukhanov (qui a contribué à l'introduction des modèles d'inflation cosmique), Thibault Damour (charismatique professeur permanent à l'IHES). Du côté des philosophes, «Many Worlds» est défendue par David Wallace à Oxford.

Avantages

- Utilise une unique équation
- Aucun ajout mathématique au formalisme orthodoxe

Inconvénients

- Expérimentalement infalsifiable (relativement à l'approche orthodoxe)
- Théorie vague dont il n'existe pas de présentation mathématiquement précise
- Absence totale de parcimonie¹⁴

4.2.2 de Broglie-Bohm (dBB)

D'abord développée par de Broglie durant les années 20, la théorie dBB fut dominée par l'interprétation de Copenhague au congrès de Solvay de 1927. De Broglie l'abandonna alors, convaincu de la supériorité de la vision défendue par Bohr Heisenberg et Pauli. La théorie a ensuite été fortement améliorée par Bohm en 1952 et surtout popularisée par Bell dans les années 1960-1970. L'idée de dBB et de réintroduire les particules dans la mécanique quantique. Ces dernières constituent la réalité, l'ontologie de la théorie.

14. Je serais mal à l'aise d'expliquer à la télévision que pour résoudre un problème technique de mécanique quantique, les physiciens choisissent de supposer qu'il existe une infinité d'univers parallèles. J'ai l'impression que si on accepte «Many Worlds» alors définir la limite entre science et pseudo-science devient encore plus difficile.

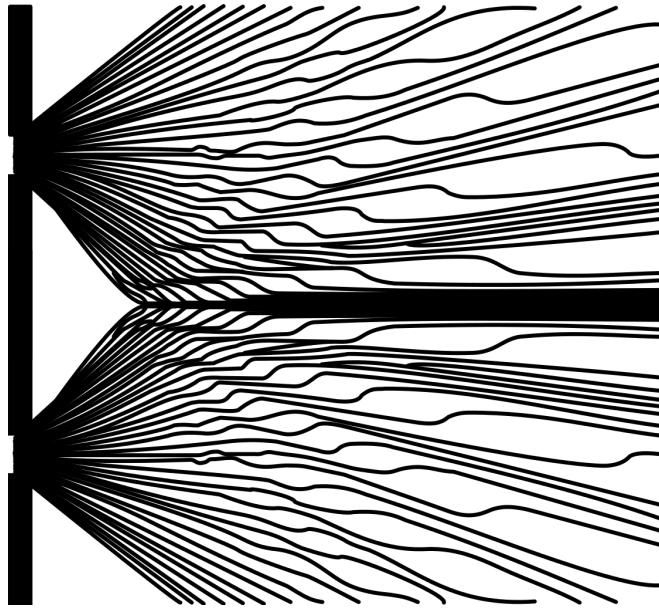


FIGURE 5 – Trajectoires possibles d'une particule dans l'expérience des fentes d'Young. On remarque qu'alors même qu'il n'y a pas de forces extérieures, les trajectoires ne sont pas rectilignes à cause de la fonction d'onde. Les trajectoires sont déterministes mais il est impossible de savoir de laquelle on part.

La fonction d'onde n'est qu'un champ qui guide leur déplacement¹⁵. L'évolution de la fonction d'onde reste donnée par l'équation de Schrödinger mais on ajoute une nouvelle équation qui explique comment les particules surfent sur les ondes :

$$\frac{dQ}{dt} = \frac{\hbar}{m} \Im m \left[\frac{\nabla \psi}{\psi} \right], \quad (2)$$

où Q est la position de la particule, m sa masse et ψ la fonction d'onde. Moralement l'équation dit simplement que connaître ψ permet de connaître la vitesse de la particule et donc d'en calculer la trajectoire.

L'évolution de l'ensemble fonction d'onde et particules est entièrement *déterministe* bien que très contre intuitive dans certaines situations. Le caractère aléatoire des résultats de mesure est expliqué par la méconnaissance de la position initiale de la particule qui, dans la théorie, ne peut jamais être connue (bien qu'il s'agisse d'une quantité bien définie). Il n'y a plus de postulat 3 car la position des particules est une donnée objective et bien définie.

Dans l'expérience des fentes d'Young, la particule passe effectivement par une des deux fentes, mais la fonction d'onde, elle, passe par les deux et guide la particule une fois la double fente passée ce qui explique les franges d'interférence. Dans dBB la dualité onde-corpuscule a une interprétation simple : *il y a à la fois une onde et un corpuscule*, pas deux facettes d'un même objet mais simplement deux objets.

Que dit dBB de la réalité ? Le monde est constitué de particules *ponctuelles* guidées par des ondes. Les particules n'ont pas de qualités ou de propriétés, tout ce qui les distingue (masse, charge, spin...) est contenu dans la fonction d'onde. Un état du monde à un instant est simplement donné par l'agencement relatif de tous ces points ponctuels sans qualités. Pour la fonction d'onde on a alors deux possibilités, soit on considère qu'il s'agit aussi d'un champ réel (psi-ontic) soit on considère que la fonction d'onde a le statut de *loi* dans le sens qu'elle prescrit le mouvement des corps ponctuels qui sont les seuls à nous intéresser vraiment, on dit dans ce cas qu'elle a un statut nomologique (comme, par exemple, le principe fondamental de la dynamique en mécanique Newtonienne).

15. On appelle ainsi souvent cette construction la théorie de *l'onde pilote*

La théorie dBB est l'archétype de la théorie réaliste et non romantique. On peut démontrer qu'elle reproduit exactement les résultats de la mécanique quantique : il ne sera jamais possible de réaliser une expérience permettant de départager les deux théories, être bohmien est ainsi un choix philosophique plus que physique. Cette théorie semble parfaite et on peut se demander à première vue pourquoi elle n'a pas écrasé la mécanique quantique¹⁶. Il existe plusieurs explications. Son formalisme est un peu plus compliqué, la mécanique quantique usuelle permet ainsi d'arriver beaucoup plus vite à des résultats identiques. Un autre défaut est que la généralisation relativiste de la théorie est peu naturelle et n'a pas la même symétrie que la théorie quantique des champs usuelle (qui contient d'ailleurs aussi tout un tas de problèmes).

Aujourd’hui, le soutien à la théorie est assez faible dans la communauté. La théorie dBB est défendue et étudiée surtout à l'université de Rutgers (notamment par Sheldon Goldstein et Roderich Tumulka) à l'université LMU de Munich (notamment par Detlef Dürr et ses disciples) et à Gênes (Nino Zanghi). En philosophie des sciences elle est défendue par Tim Maudlin à NYU, Valia Allori à Northern Illinois University et Michael Esfeld à Lausanne. La théorie intéresse en général beaucoup les philosophes car elle est un contre exemple pour beaucoup d'affirmations excessives sur les implications de la mécanique quantique. L'exemple le plus significatif est que dBB est entièrement déterministe, l'aléatoire émergeant de l'ignorance des conditions initiales un peu comme en physique statistique. La mécanique quantique n'implique pas nécessairement que la Nature est fondamentalement aléatoire (ce fait dépend de l'interprétation que l'on choisit).

Avantages

- Ce que dit la théorie du monde est simple
- Déterministe
- L'influence de la mesure est purement mécanique

Inconvénients

- Expérimentalement infalsifiable (relativement à l'approche orthodoxe)
- Difficile à rendre compatible avec l'«esprit» de la relativité restreinte
- Contient 2 équations au lieu d'une seule

4.2.3 Collapse objectif

L'idée des théories du collapse objectif est, comme leur nom l'indique, de rendre objectif (i.e. indépendant de l'observateur) le collapse de la fonction d'onde. L'idée est de modifier¹⁷ de manière infime le postulat 2 d'évolution en ajoutant des termes non linéaires dans l'équation de Schrödinger. On obtient alors le postulat 3 de manière effective à partir du postulat 2 ce qui était impossible avec la mécanique quantique standard.

Que disent les théories du collapse objectif de la réalité ? Cette fois-ci le monde est constitué de matière continue sans qualités. Un état du monde est donné par la densité de ce *stuff* sans propriétés en chaque point de l'espace. Pour que ces théories fonctionnent on peut démontrer que la modification faite à l'équation de Schrödinger est nécessairement aléatoire : la théorie est donc intrinsèquement aléatoire (l'aléa n'est pas la conséquence d'une méconnaissance des conditions initiales du monde). Dans l'expérience des fentes d'Young, la matière continue se divise entre les deux fentes puis interfère avec elle-même «comme une onde». Lorsque l'onde atteint l'écran, alors une étude fine de l'évolution combinée de la matière constituant l'écran et de la matière incidente avec la *nouvelle* équation de Schrödinger montre que l'onde incidente se concentre sur une zone extrêmement petite de l'écran (comme un corpuscule) et de manière aléatoire.

16. Les bohmiens s'en lamentent d'ailleurs à chaque conférence.

17. Il existe de nombreuses déclinaisons du collapse objectif qui se distinguent par les modifications ajoutées à l'équation de Schrödinger. Les plus connues sont principalement GRW, pour Ghirardi-Rimini-Weber (proposée en 1986) dans laquelle on ajoute à l'équation de Schrödinger des termes qui font se contracter la fonction d'onde de manière brutale et aléatoire, et CSL, pour *Continuous Stochastic Localization*, dans laquelle les termes ajoutés sont aléatoires mais continus, moins brutaux. Il existe enfin une version dite de Diósi-Penrose où la modification de l'équation de Schrödinger est reliée à un effet gravitationnel.

Dans la classification précédente, les théories du collapse objectif sont donc à la fois réalistes, non romantiques et psi-ontic. À la différence de certaines interprétations de la mécanique quantique comme celle de l'onde pilote, les théories du collapse objectif font des prédictions légèrement différentes de celles de la mécanique quantique et seront ainsi peut-être un jour testables. En particulier elles prédisent que la linéarité de l'évolution (et donc le principe de superposition) n'est qu'approximative : il devrait être impossible de réaliser l'expérience des fentes d'Young avec des molécules trop grosses. Une telle limitation aurait un impact technologique fondamental car elle montrerait qu'il existe des limites théoriques et pas uniquement pratiques à la réalisation d'un ordinateur quantique et plus généralement à toutes les applications de la mécanique quantique au transport et au traitement de l'information.

Beaucoup de physiciens restent néanmoins sceptiques vis à vis de ces théories et leur reprochent notamment leur relative complexité mathématique. Cette dernière les rend il est vrai assez peu séduisantes comparativement à l'extrême simplicité de la mécanique quantique. Ces théories sont aussi ad hoc car on met exactement la bonne modification de l'équation de Schrödinger pour changer au minimum les prédictions expérimentales sans avoir d'autre raison pour fixer les paramètres à leur valeur. Au moins le débat ne durera-t-il pas éternellement car les différences ne sont pas ici uniquement d'ordre philosophique et pourront être tranchées par l'expérience.¹⁸

Ce faisceau d'approches est étudié principalement à Trieste par Angelo Bassi et son groupe (et avant lui Giancarlo Ghirardi) avec des contributeurs plus isolés à New York (Philip Pearle), Princeton (Steven Adler), Oxford (Daniel Bedingham), Paris (Frank Laloë) et Budapest (Lajos Diosi).

Avantages

- Une seule équation pour tout décrire
- Falsifiable
- Peut-être rendu compatible avec la relativité
- Ce que dit la théorie du monde est clair
- L'influence de la mesure est purement mécanique

Inconvénients

- Ad hoc (la théorie a de nouveaux paramètres)
- Mathématiques plus techniques
- Non déterministe¹⁹

4.3 Interprétations opérationnalistes

4.3.1 Copenhague modéré : quantum pragmatism

L'interprétation dominante que j'appelle ici Copenhague modéré (cette appellation n'est pas universelle) est celle qui est adoptée par le plus grand nombre de physiciens. Elle consiste à admettre qu'il existe effectivement un léger flottement dans les postulats sur la séparation entre classique et quantique. Néanmoins, elle n'accorde pas grande importance à ce problème dans la mesure où la procédure qui consiste à mettre le classique le plus loin possible du système considéré résout en pratique tous les problèmes expérimentaux. Mettre le classique le plus loin possible du système étudié signifie simplement considérer que l'appareil de mesure est quantique et décrit lui même par l'équation de Schrödinger, puis qu'il est mesuré par un autre appareil de mesure, lui aussi quantique et ainsi de suite jusqu'à ce que le dernier appareil de la chaîne, éventuellement l'humain qui lit le résultat, soit classique et entraîne le collapse du paquet d'onde de l'ensemble. Pratiquement on peut toujours rendre cette chaîne (appelée parfois chaîne de mesures) assez longue pour expliquer tous les résultats. Même si la théorie n'est pas parfaite d'un point de vue logique, son contenu opérationnel reste ainsi excellent, il n'est pas utile d'en changer ou

18. Les théories du collapse objectif prévoient entre autres qu'il n'est pas possible de faire interférer des objets trop gros quel que soit le contrôle que l'on a sur l'environnement.

19. Mettre cette caractéristique dans les inconvénients est hautement subjectif

de le remettre en question (c'est du moins l'avis des défenseurs de cette interprétation). Il s'agit d'une interprétation à la fois opérationnaliste et non romantique qui est utilisée par la plupart des expérimentateurs.

Avantages

- Modeste
- Pragmatique
- Non romantique

Inconvénients

- N'explique rien

4.3.2 Copenhague extrême : rôle de la conscience

La version extrême de l'interprétation précédente ne se satisfait pas du caractère un peu expérial du choix de la chaîne de mesure et stipule qu'il faut préciser exactement où elle doit s'arrêter. On définit alors la conscience (humaine?) comme le point où les superpositions quantiques se brisent effectivement. Dans cette interprétation, le chat de Schrödinger n'est effectivement que mort ou que vivant au moment où un être conscient ouvre la boîte. Aussi bizarre et pour le coup ultra romantique que soit cette interprétation, c'est la seule qui est logiquement cohérente avec les postulats standards de la mécanique quantique (c'est à dire la seule qui ne les voit pas comme une approximation ou la simple description d'une procédure). La cohérence interne n'en fait pas moins une interprétation un peu absurde quasi solipsiste que l'on n'ose plus trop défendre aujourd'hui.

Avantages

- Seule interprétation logiquement cohérente de l'interprétation de Copenhague

Inconvénients

- Solipsiste
- Mystique
- À tout jamais impossible d'expliquer la conscience elle-même

4.3.3 Bayésianisme quantique

C'est la représentante la plus populaire des interprétations opérationnalistes aujourd'hui. Elle est très populaire chez les physiciens de l'information quantique (domaine qui généralise la théorie de l'information usuelle au monde quantique). C'est l'interprétation la plus psi-epistemic qui existe. Pour elle, la théorie quantique est simplement une théorie des probabilités généralisées, la fonction d'onde elle-même est une distribution de probabilité généralisée. Si les résultats de la mécanique quantique semblent absurdes du point de vue de la logique, du point de vue des probabilités usuelles, du point de vue de la théorie de l'information, c'est que ces dernières sont à changer. Il «suffit» d'introduire une logique quantique (dans laquelle le «et» est possible et pas seulement le «ou»), introduire une théorie des probabilités généralisée dans laquelle des distributions peuvent interférer entre elles (même si cela est absurde du point de vue de la théorie des probabilités standards, vestige de notre incompréhension classique). Le postulat 3 est simplement l'analogue «généralisé» du conditionnement en théorie des probabilités (règle de Bayes). Il n'y a évidemment plus aucun paradoxe puisqu'on a modifié la logique même, la manière même dont on est supposé raisonner. Il n'y a évidemment plus non plus de réalité, seulement de l'information²⁰.

20. Même s'il est séduisant de dire que le monde n'est constitué que d'information (cela fait révolutionnaire), on peut noter comme Bricmont qu'il faut encore savoir d'information *sur quoi*! Il n'est pas si facile d'éjecter le problème de la réalité de la physique.

Cette interprétation a récemment gagné en popularité sous l'impulsion de David Mermin et Chris Fuchs qui en sont des avocats persuasifs. L'expérience prouve que sa popularité déborde même de la sphère des théoriciens de l'information quantique²¹ sans que je ne sois capable d'en donner une explication.

Avantages

- Fait moderne (lien avec la théorie de l'information)
- Assez efficace en pratique pour trouver des résultats

Inconvénients

- Solution extrême (si on modifie la logique, alors il est difficile de savoir ce qu'«expliquer» veut dire)
- Qu'est ce que l'information pure ?

4.4 Interprétations exotiques

Il sort chaque année de nouvelles interprétations plus ou moins crédibles de la mécanique quantique. Les dernières en date sont l'interprétation en terme d'automate cellulaire par G. 't Hooft (prix Nobel) qui date de 2013 et est présentée dans une pré-publication incompréhensible [8], et la (très prometteuse) théorie des mondes multiples en interaction –*many interacting worlds*– qui a été proposée par Dirk-André Deckert et d'autres [3] en octobre 2014 (elle est présentée succinctement dans un article grand public de Nature [1]). De manière intéressante, c'est la seule théorie dans laquelle il n'y a plus du tout de fonction d'onde.

4.5 Résumé

L'étude des interprétations est importante car elle permet de dissiper de nombreux malentendus sur ce qu'est supposée impliquer la mécanique quantique.

1. La mécanique quantique *n'implique pas nécessairement* qu'il est impossible de définir une réalité sans parler d'observateur et de mesure.
2. La mécanique quantique *n'implique pas nécessairement* qu'il est possible de maintenir dans un état de superposition des réalités a priori antagonistes comme le chat mort et vivant. (c'est le cas dans «Many Worlds» mais pas dans les autres interprétations)
3. La mécanique quantique *n'implique pas nécessairement* que la Nature est intrinsèquement aléatoire (c'est le cas par exemple dans les théories du collapse objectif mais pas dans dBB). Elle implique en revanche qu'il existe bien un obstacle à la connaissance et donc qu'il y a au moins un aléa né de l'ignorance.
4. La mécanique quantique *n'implique pas nécessairement* qu'il est impossible de parler de la trajectoire d'une particule (dans dBB on a le droit, simplement les trajectoires sont très bizarres).

Il est évidemment possible de soutenir les attitudes précédentes, il faut simplement avoir à l'esprit qu'elles ne sont pas des conséquences logiques inévitables de la mécanique quantique.

Mais alors que reste-t-il ? La mécanique quantique impose-t-elle seulement quelque chose ? Existe-t-il une seule chose que la mécanique quantique nous dit qualitativement du monde qui ne soit pas dépendante de l'interprétation ? La réponse est donnée par le théorème de Bell : il existe au moins une caractéristique contre intuitive nécessaire que doit contenir toute théorie qui voudrait reproduire les résultats de la mécanique quantique, la *non-localité*. La mécanique quantique impose une forme faible d'action instantanée à distance, la «non-localité» qui est indépendante de l'interprétation, et est donc inévitable. Ce sera (en partie) le sujet du prochain cours.

21. Jean Dalibard, nobélisable insoupçonnable de raisonnement hâtif, m'a dit qu'il trouvait qu'il s'agissait de l'interprétation la plus séduisante.

Références

- [1] A quantum world arising from many ordinary ones. *Nature news* : <http://www.nature.com/news/a-quantum-world-arising-from-many-ordinary-ones-1.16213>.
- [2] Angelo Bassi and GianCarlo Ghirardi. A general argument against the universal validity of the superposition principle. *Physics Letters A*, 275(5) :373–381, 2000.
- [3] Michael J. W. Hall, Dirk-André Deckert, and Howard M. Wiseman. Quantum phenomena modeled by interactions between many classical worlds. *Phys. Rev. X*, 4 :041013, Oct 2014.
- [4] Franck Laloë. *Comprendons-nous vraiment la mécanique quantique ?* EDP sciences, 2013.
- [5] T. Norsen and S. Nelson. Yet Another Snapshot of Foundational Attitudes Toward Quantum Mechanics. *ArXiv e-prints*, June 2013.
- [6] Matthew F Pusey, Jonathan Barrett, and Terry Rudolph. On the reality of the quantum state. *Nature Physics*, 8(6) :475–478, 2012.
- [7] M. Schlosshauer, J. Kofler, and A. Zeilinger. A Snapshot of Foundational Attitudes Toward Quantum Mechanics. *ArXiv e-prints*, January 2013.
- [8] G. ’t Hooft. The Cellular Automaton Interpretation of Quantum Mechanics. A View on the Quantum Nature of our Universe, Compulsory or Impossible ? *ArXiv e-prints*, May 2014.