

«Je ne comprends rien à la mécanique quantique»

Antoine Tilloy ^{*}[†]

Notes commencées le 12 août 2014, dernières modifications
Novembre 2014

1 Introduction

Ce court texte s'adresse à l'étudiant qui suit ses premiers cours de mécanique quantique et qui se dit que, décidément, il n'y comprend rien. Je ne me crois évidemment pas au dessus de lui et voudrait au contraire lui éviter mes hésitations. Lorsque j'ai moi même appris la mécanique quantique, je crois que je n'en ai pas compris beaucoup plus que la surface. Pire au bout d'un moment, j'ai simplement arrêté de me poser des question ; après tout, si ça marche pour quoi s'embêter¹. L'incitation perverse majeure est qu'à court terme, plus vite on accepte le formalisme sans trop se poser de questions, plus vite on majore le partielle, pète en deux ses potes et passe pour une machine. L'idée n'est évidemment pas de négliger le formalisme – il est fondamental et il faut le maîtriser parfaitement – mais d'être sûr que l'on comprend bien ce que dit et ce que ne dit pas la mécanique quantique au delà de son formalisme. C'est à mon avis utile pour plusieurs raisons. Tout d'abord parce que, si on ne s'est pas posé de questions, on garde longtemps l'impression désagréable d'être un imposteur ou un imbécile quand on applique le formalisme comme un bourrin sans rien y comprendre (je parle évidemment pour moi). Aussi parce que plus tard, et c'est toujours mon cas, on est obligé de comprendre un peu plus finement la mécanique quantique quand on doit traiter des systèmes plus complexes, ou, mais c'est quasiment un péché d'en parler, qu'on cherche une théorie alternative. Un dernier écueil possible est de se contenter de réponses ou de justifications ultra simplistes à ce qui n'est en fait que de la paresse intellectuelle (du genre, "il n'y a rien à comprendre en mécanique quantique", "la science doit prédire, la théorie fonctionne, le reste n'a pas d'importance"). L'objectif de ces quelques lignes est donc d'aider le lecteur à bien poser les questions sur la mécanique quantique et à bien saisir d'où viennent les problèmes car c'est à mon avis là la clé. En effet un grand nombre de questions que l'on se pose au départ sur la mécanique quantique ont des réponses simples et ne font pas nécessairement appel à une quelconque bizarrerie quantique, d'autres encore sont simplement mal posées, seule une dernière catégorie souvent minoritaire touche à l'essence

^{*}Laboratoire de Physique Théorique, ENS Paris

[†]contact : tilloy@lpt.ens.fr

1. Le facteur gyromagnétique de l'électron, calculé avec 12 chiffres significatifs corrects (au moins) en QED, est en général l'argument massue qui permet de calmer immédiatement l'étudiant rebelle.

de la bizarrie quantique et possède un réel intérêt. J'essaie ici simplement de faire le tri.

2 Le statut de la théorie quantique

La théorie quantique est une théorie générale de la prédiction, en fait même une des plus générales possibles. À ce titre, et contrairement à d'autres théories, elle a a priori vocation à s'appliquer à l'ensemble de la physique, connue ou inconnue. La mécanique quantique est la théorie quantique appliquée à la mécanique newtonienne, ou plus généralement à toute théorie physique non relativiste. Par abus de langage on appelle parfois mécanique quantique la théorie quantique dans son ensemble (et je le ferai parfois). Il est évidemment possible de faire bien plus avec la théorie quantique et d'aller jusqu'à y intégrer la relativité restreinte, avec *la théorie quantique des champs* (TQC ou QFT en anglais) et 3 des 4 forces fondamentales de la nature via les *théories de jauge* (gauge theory). L'ensemble obtenu est le *modèle standard* qui a été achevé avec la découverte récente du boson de Higgs au LHC. La dernière force fondamentale, la gravitation, n'a pas pu être intégrée au schéma général de la TQC comme les autres forces ; on dit que la gravitation est *non renormalisable*, ce qui signifie pour simplifier que les astuces que l'on utilise en TQC pour donner un sens à des quantités divergentes ne peuvent pas fonctionner. D'un point de vue purement logique, cela ne signifie pas que la théorie quantique est fondamentalement incompatible avec la gravitation (même si votre serviteur a tendance à le penser), cela signifie simplement que la voie la plus naïve d'unification via la TQC² ne fonctionne pas. Le consensus actuel est que la théorie quantique, c'est à dire l'ensemble des axiomes fondamentaux appris en cours de L3, restera probablement vraie dans une hypothétique théorie unifiée. La théorie des cordes est une théorie en construction qui va dans cette direction. Elle conserve la théorie quantique à l'identique, change l'objet fondamental par rapport à la TQC (on passe d'un point à une corde) et obtient la gravitation de manière émergente. Le problème est qu'elle a bien du mal à faire tout le reste et que ça commence à faire longtemps qu'on essaie³. Devant les difficultés actuelles de la théorie des cordes, d'autres théories émergent, certaines gardent la théorie quantique intacte, d'autres non.

Cette courte explication a pour but de mettre en valeur l'importance qu'il y a à comprendre la théorie quantique car c'est elle qui structure toutes les théories et toute la physique fondamentale qui viennent après elle. Même des branches comme la Cosmologie, historiquement uniquement décrites par la relativité générale sont aujourd'hui envahies par la théorie quantique. Même si votre but ultime est à terme de dépasser la théorie quantique (ce qui encore une fois n'est pas a priori nécessaire pour unifier la physique), il vaut peut-être mieux la comprendre finement car il faudra à minima être capable de reproduire ses prédictions standards qui n'ont jusqu'à maintenant jamais été démenties.

2. En admettant que l'on ne peut pas définir proprement de théorie des champs qui ne soit pas renormalisable. C'est admis par tout le monde, mais pour être honnête je ne sais pas quel est le statut de cette preuve.

3. Avant de faire une thèse en théorie des cordes, il peut être souhaitable de lire les livres de Lee Smolin ou Peter Woit qui en font une présentation assez critique. La science n'étant pas la foi, il est toujours intéressant de lire les hérétiques.

3 Réalisme et opérationnalisme

3.1 Rappel des postulats

Avant de disserter il faut être sûr de savoir de quoi on parle. Je rappelle ici très brièvement et de manière volontairement imprécise les postulats de la théorie quantique. J'imagine que le lecteur en a déjà l'habitude et les a déjà appliqués au moins quelques fois.

1- État du monde : Tout ce que l'on peut dire⁴ de l'état du monde est représenté par un *rayon* $|\psi\rangle$ dans un espace de Hilbert \mathcal{H} , c'est à dire un vecteur normé.

2- Évolution : L'état $|\psi\rangle$ évolue de manière unitaire. L'équation de Schrödinger est la spécification de cette évolution unitaire ou, ce qui est équivalent mathématiquement, de son générateur infinitésimal qui est le Hamiltonien.

3- Mesure : Étant donné un rayon $|u\rangle$ de l'espace de Hilbert, une mesure de $|u\rangle$ à un instant t donne un résultat positif avec probabilité $p = |\langle u|\psi\rangle|^2$ auquel cas le système est dans l'état $|u\rangle$ à l'issue de la mesure, ou la mesure donne un résultat négatif avec la probabilité complémentaire et le système est dans l'état $\frac{|\psi\rangle - \langle u|\psi\rangle|u\rangle}{\|\psi\rangle - \langle u|\psi\rangle|u\rangle}$ à l'issue de la mesure. La généralisation au cas d'un sous espace vectoriel est immédiate : étant donné un sous espace vectoriel V de \mathcal{H} , une mesure de V à un instant t donne un résultat positif avec probabilité $p = |\mathcal{P}_V|\psi\rangle|^2$ auquel cas le système est dans l'état $\frac{\mathcal{P}_V|\psi\rangle}{\|\mathcal{P}_V|\psi\rangle}$ à l'issue de la mesure, ou la mesure donne un résultat négatif avec la probabilité complémentaire et le système est dans l'état $\frac{(\mathbb{I} - \mathcal{P}_V)|\psi\rangle}{\|(\mathbb{I} - \mathcal{P}_V)|\psi\rangle}$. Ici, l'opérateur \mathcal{P}_V est simplement le projecteur sur le s.e.v V .

Le premier postulat précise l'objet fondamental que va décrire la mécanique quantique. Dès le départ on voit que ce que représente cet objet n'est pas extrêmement clair, son statut n'est pas vraiment défini (autrement que mathématiquement) ce qui explique qu'on ait souvent du mal à dire de quoi parle vraiment la mécanique quantique. Le deuxième postulat est celui qui donne la dynamique de l'objet introduit dans le premier axiome. La combinaison des deux premiers axiomes donne en conséquence le principe de superposition que l'on donne parfois séparément. On le résume parfois confusément en disant que si deux réalités éventuellement classiquement antagonistes sont possibles, alors leur superposition est possible et surtout l'évolution est simple et découpée⁵. Mais il faut noter que la théorie ne parle pas de réalité et que, sans interprétation supplémentaire du formalisme, on ne peut pas faire dire plus au principe de superposition que ce qu'en disent les deux premiers axiomes. Le dernier axiome dit enfin plus précisément de quoi parle la théorie, c'est à dire exclusivement

4. Savoir si cet état représente une réalité, est une sorte de probabilité généralisée sur une réalité qui existe quand même, ou une sorte de probabilité généralisée uniquement sur des résultats de mesure sans qu'il puisse même exister de réalité sous-jacente est une question d'interprétation que ne règlent pas les axiomes. On verra plus tard que le statut du vecteur d'état n'est pas très clair.

5. Ce qui ne veut pas dire que les *résultats* de mesure sont découpés car les probabilités sont quadratiques en les états.

de probabilités de résultats de mesure. Je n'ai pas mis la description de la mesure usuelle avec les opérateurs hermitiens (i.e. les *observables*) à l'intérieur de l'axiome 3 car il me semble que la description en terme de projecteurs est plus simple à ce stade. Un opérateur autoadjoint peut être construit comme une combinaison linéaire de projecteurs sur des espaces orthogonaux et on utilise ensuite l'axiome 3 pour trouver les probabilités des différents résultats de mesure. On voit d'ailleurs ainsi que les valeurs propres de l'observable sont en fait assez inutiles et ne servent que de labels aux différents résultats de mesure possibles. Il suffit simplement qu'il s'agisse de réels différents pour distinguer deux résultats différents. Mais ces nombres n'ont aucun impact sur les calculs eux mêmes et on pourrait très bien remplacer les valeurs propres réelles par des qualités (comme rouge ou vert plutôt que ± 1). La description en terme de projecteurs n'a pas cet élément superflu et même si en pratique on utilise tout le temps les observables, si l'objectif est de donner les axiomes ou postulats au cœur de la théorie, on peut s'en passer quitte à les récupérer trivialement ensuite.

3.2 Une théorie de la prédiction

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, tout les raisonnements en mécanique quantique sont fait 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 prédirer avait justement l'air paradoxalement plus simple que décrire. En philosophie, la révolution analogue a eu lieu avec la phénoménologie. Un autre élément plus anecdotique qui vient confirmer la vision de la théorie quantique comme une théorie générale de la prédiction est qu'il s'agit de l'extension non commutative la plus simple à la théorie des probabilités traditionnelles ce qui la place ainsi plus du côté de l'observateur que d'une hypothétique réalité. Trouver qu'une théorie physique peut se contenter de prédirer sans décrire et ne poser des questions que sur les résultats de mesure, c'est adopter un point de vue *opérationnaliste*⁶ (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).

6. 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.

3.3 La quête du réalisme est difficile mais défendable

Une erreur (de logique) assez courante que l'on peut faire à la suite de la précédente constatation dans une sorte d'excès de positivisme est de déclarer de manière un peu péremptoire qu'on ne peut pas parler ni même penser à des quantités non mesurables dans des expériences. La théorie ne dit pas ça, ce n'est pas parce qu'elle ne s'intéresse qu'aux prédictions qu'a priori le reste n'existe pas et qu'il est absurde d'en parler; je le répète, la théorie ne s'en occupe simplement pas. En effet, la théorie quantique pourrait être une théorie purement effective déduite d'une théorie de la réalité objective (typiquement une théorie à variables cachées) et qui n'extrairait de cette dernière que les quantités auxquelles les observateurs, humains ou non, auraient un accès direct. Bref il n'est pas absurde de se poser des questions sur la réalité, de se demander ce qui se passe quand on ne mesure pas, etc. Simplement la théorie quantique ne dit rien dessus et il ne faut pas espérer y trouver des réponses.

Une fois cette constatation d'ordre purement logique effectuée, on peut tout de même donner un argument très fort allant contre cette entreprise de construction d'une réalité sous-jacente à la physique quantique. Cet argument, qu'on a longtemps cru imparable, c'est l'inégalité de Bell⁷.

3.4 L'inégalité de Bell ou les limites du réalisme

L'inégalité de Bell est une inégalité purement classique, c'est à dire qui ne parle à aucun moment de la théorie quantique. C'est une inégalité qui est valable pour toute théorie qui suppose qu'il existe une réalité locale, c'est à dire que le monde est constitué d'objets dotés de propriétés locales. Ce qui est fort c'est que l'inégalité ne repose sur rien d'autre que cette hypothèse qui semble complètement évidente. Cette théorie réaliste peut-être stochastique, le théorème de Bell ne dit absolument rien sur le déterminisme comme on l'entend parfois.

Je propose de dériver l'inégalité de Bell sur ce qui semble être un exemple mais contient en fait toute la généralité du problème. Je m'inspire ici de la présentation et de la preuve données par Jean Bricmont [5].

On suppose que l'on a deux individus qui vont devoir répondre à trois questions A, B et C. À chaque fois la réponse doit être vrai ou faux. Ils ont le droit de s'entendre au départ, de discuter autant de temps qu'ils le veulent. Puis on les sépare, éventuellement très très loin (un à chaque coin de la galaxie), et on leur pose aléatoirement la question A, B ou C de manière aléatoire et indépendante de ce qui se passe de l'autre côté. On répète l'expérience une infinité de fois. La contrainte qu'on impose aux deux individus, c'est que lorsque par hasard on leur pose la même question, ils répondent la même chose. Maintenant on peut se convaincre rapidement que la seule stratégie permettant de satisfaire systématiquement cette contrainte est que les deux individus se mettent d'accord sur une réponse prédéterminée pour chaque question. C'est une évidence, mais il faut bien s'en convaincre avant de continuer. Lecteur, c'est le moment de réfléchir ou d'essayer de trouver un contre exemple.

Dans cette expérience et avec les contraintes que l'on a donné, *les réponses des deux individus ne peuvent pas être trop anticorrelées, c'est à dire qu'il ne*

7. En toute rigueur, c'est la démonstration de sa violation par la théorie quantique qui constitue l'argument que l'on appelle en général le théorème de Bell.

peut pas y avoir trop de désaccord entre les deux individus, c'est la constatation principale de John Bell. Comme il y a trois questions et deux réponses possibles, il y a essentiellement deux situations. Soit ils se sont mis d'accord pour répondre tout le temps la même chose (i.e. tout le temps vrai ou tout le temps faux à toutes les questions) et la corrélation entre les réponses des deux individus est forcément totale. Soit ils ont répondu deux vrais et un faux (ou l'inverse, par exemple A : vrai, B : vrai, C : faux) et dans ce cas la probabilité qu'ils répondent la même chose vaut $p = \frac{1}{3} \frac{2}{3} + \frac{1}{3} \frac{2}{3} + \frac{1}{3} \frac{1}{3} = \frac{5}{9}$. Bref dans tous les cas $p \geq \frac{5}{9}$, c'est l'inégalité de Bell, version simplifiée et sur un cas ultra particulier mais qui permet de se rendre compte qu'il s'agit d'un résultat essentiellement trivial. La réelle difficulté, qui n'est néanmoins pas insurmontable, est de trouver un système quantique qui viole cette inégalité extrêmement simple.

Considérons désormais deux particules. Les réponses aux questions A,B,C correspondent aux caractéristiques de ces deux particules et l'infinité des stratégies possibles aux variables cachées. On imagine que les deux particules sont initialement au même endroit puis qu'on les éloigne avant de mesurer aléatoirement une de leur propriété (A,B ou C). La situation est évidemment complètement identique au jeu précédent avec des individus. A,B et C peuvent-être des questions du type "la charge est-elle positive?", "la masse est elle supérieure à x ?", etc. Maintenant nous allons essayer de violer l'inégalité de Bell dans le cas où les particules sont quantiques. On va désormais considérer des particules de spin $\frac{1}{2}$ et leur poser trois questions A,B et C correspondant à des angles de mesure du spin différents. On se doute que le fait que ces observables ne commutent pas va jouer un rôle fondamental. Il faut ensuite choisir un état du système des deux particules, typiquement un état intriqué, pour voir si l'inégalité peut être violée. Notons qu'il y a de multiples manières de violer cette inégalité que je ne propose ici qu'une parmi d'autres, peut-être même pas la plus évidente. On part de l'état intriqué suivant :

$$|\psi\rangle = \frac{|+\rangle_z \otimes |+\rangle_z + |-\rangle_z \otimes |-\rangle_z}{\sqrt{2}} \quad (1)$$

Cet état est intéressant parce qu'il est intriqué, mais aussi parce qu'il s'écrit de la même manière si on tourne la base. En effet en utilisant la notation :

$$\begin{aligned} |+\rangle_\theta &= \cos \theta |+\rangle_z + \sin \theta |-\rangle_z \\ |-\rangle_\theta &= -\sin \theta |+\rangle_z + \cos \theta |-\rangle_z \end{aligned}$$

On obtient simplement en développant l'expression que :

$$\forall \theta, |\psi\rangle = \frac{|+\rangle_\theta \otimes |+\rangle_\theta + |-\rangle_\theta \otimes |-\rangle_\theta}{\sqrt{2}} \quad (2)$$

Il nous faut désormais choisir les bonnes questions A, B et C. On choisit de prendre pour A la mesure du spin selon Z (i.e. dans la base $|+\rangle_z, |-\rangle_z$), B la mesure du spin tournée de $2\pi/3$ (i.e. dans la base $|+\rangle_{2\pi/3}, |-\rangle_{2\pi/3}$) et C la mesure du spin encore tournée de $2\pi/3$ (i.e. dans la base $|+\rangle_{-2\pi/3}, |-\rangle_{-2\pi/3}$). Notons premièrement que comme l'état s'écrit de la même manière dans les trois bases correspondant aux mesures, lorsque la même mesure est effectuée sur chaque spin (i.e. la question A, B ou C) alors les résultats sont parfaitement corrélés. Ensuite si on choisit aléatoirement les questions, la probabilité de mesurer la même chose de chaque côté est exactement $p = 1/2$, c'est à dire moins

que ce qui est autorisé par l'inégalité de Bell, $p > \frac{5}{9}$. La preuve est immédiate : supposons que l'on mesure Z pour le premier spin, i.e. que l'on pose la question A. Dans ce cas si la question posée au second spin est aussi A, la corrélation est totale. Si la question est B ou C, la probabilité de répondre la même chose est seulement $\cos^2(2\pi/3) = \frac{1}{4}$. Ainsi la probabilité sachant que la question A est posée d'un côté (sans savoir ce qui est posé de l'autre côté) d'avoir les deux réponses identiques vaut $p = \frac{1}{3}1 + \frac{1}{3}\frac{1}{4} + \frac{1}{3}\frac{1}{4} = \frac{1}{2}$. Les deux autres cas fournissent évidemment la même réponse. Il est donc possible de violer l'inégalité de Bell avec un système quantique simple. Pour résumer, dans la situation considérée, un raisonnement élémentaire qui ne fait que supposer que les objets sont dotés de propriétés locales, autrement dit qu'il existe une réalité locale (on dit aussi naïve), permet de prouver que $p > \frac{5}{9}$, inégalité qui est violée pour un système quantique intriqué pour lequel $p = 1/2$. La conclusion est qu'aucune théorie supposant qu'il existe une réalité locale, même si elle est très compliquée, ne peut reproduire les résultats de la mécanique quantique. C'est ce que l'on appelle parfois le théorème de Bell. Ce qu'on appelle réalité locale, ou propriété locale dans l'exemple précédent, c'est une stratégie complète, éventuellement très compliquée, qu'un individu peut mettre en place pour répondre aux questions sans avoir besoin d'informations non locales, c'est à dire de ce que répond l'autre individu. L'analogue d'une stratégie pour une particule par exemple, c'est un ensemble de variables supplémentaires éventuellement inconnues (cachées) qui encode le comportement vis à vis de la mesure (la stratégie qui dit ce qu'il faut répondre). À ce stade tout est encore théorique et il faudrait encore vérifier que l'inégalité de Bell est effectivement violée dans la nature. La conclusion définitive a été apportée par l'équipe d'Alain Aspect en 1982 à Orsay en utilisant la polarisation de photons uniques plutôt que le spin de particules. Le résultat est que l'inégalité est violée sans doute possible, la violation trouvée étant exactement celle prédicta par la mécanique quantique.

Ce résultat pose des limites assez fortes à notre compréhension de la mécanique quantique. En effet, si par comprendre une théorie physique on entend être capable de lui trouver une ontologie locale, c'est à dire en gros de décrire la *substance*, par définition locale, de la nature, alors c'est impossible car inconciliable avec la théorie quantique et surtout l'expérience. Ce que montre le théorème de Bell, c'est que la nature est massivement non locale, quelle que soit la théorie qu'on utilise pour la décrire. On reproche souvent aux théories qui tentent de dépasser la théorie quantique d'être non-locales, mais ce que montre le théorème de Bell c'est que cette non localité est intrinsèque à la nature et donc en premier lieu à la théorie quantique. Le théorème de Bell ne dit pas qu'il est impossible de trouver une réalité sous-jacente à la physique quantique, il dit simplement que cette réalité doit être non locale (alors que naïvement, on a tendance à attacher la localité à la réalité) et donc nécessairement compliquée si elle existe. Il ne suffit pas, par exemple, d'introduire un nombre arbitraire de variables cachées, on est obligé d'une certaine manière de lier les objets entre eux.

En ce sens une part de la bizarrerie de la mécanique quantique (en gros celle qui vient de l'intrication) est irréductible. Il faut prendre conscience de la force d'une telle démonstration théorique et expérimentale de l'irréductible bizarrerie de la nature. Pour autant il ne faut pas faire dire au théorème de Bell ce qu'il ne dit pas. Stricto sensu, le théorème de Bell ne parle pas directement du déterminisme. Il ne prouve pas non plus que la théorie quantique est indépassable

ou incompréhensible. Il pose simplement des contraintes assez fortes prouvant qu'une compréhension naïve est hors de portée.

Notons qu'il est possible de montrer un résultat analogue en n'effectuant qu'une seule mesure. Ainsi, même si la preuve que j'ai donnée demande en toute rigueur une infinité d'expériences pour atteindre une violation certaine, il existe une preuve certes plus compliquée qui n'a pas cette contrainte.

Il faut ajouter que la non-localité de la nature est extrêmement subtile car elle n'autorise que très peu de choses. En particulier l'intrication ne peut pas être un vecteur d'action : on ne peut pas transmettre d'information par de l'intrication, tout au plus peut-on mettre en évidence des corrélations surprenantes a posteriori. C'est d'ailleurs heureux, car sinon on aurait eu bien du mal à construire une théorique quantique relativiste. En outre je ne peux faire aucune mesure sur un système quantique qui me dise s'il est intriqué avec un autre ou pas. L'intrication contient ainsi une grande part de ce qui est beau et surprenant en mécanique quantique, sans pour autant permettre une interprétation mystique un peu new-age prétendant que tout est lié dans l'univers que la télépathie instantanée est possible ou qu'il faut manger du soja bio en respirant de l'encens.

3.5 Statut du vecteur d'état

On vient de voir qu'il était difficile de postuler une réalité sous-jacente descriptive qui complète la théorie quantique qui est a priori exclusivement prédictive. Mais est-ce vraiment le cas ? On peut se demander quel est le statut physique du vecteur d'état (ou de la fonction d'onde) d'un système quantique. Ce vecteur d'état contient-il la réalité non-locale que l'on cherche, a-t-il une réalité physique ? Ou est-il simplement le reflet de notre connaissance du monde ? Si on est d'accord avec le premier cas, on dit que l'on est psi-ontic, le vecteur d'état contient l'être, la réalité, dans le second cas on est psi-epistemic, le vecteur d'état est du côté de l'observateur et contient sa connaissance du monde qu'il existe ou non une réalité sous-jacente. Ces deux catégories sont distinctes du réalisme et de l'opérationnalisme et on peut imaginer à peu près toutes les combinaisons possibles. S'il existe un débat c'est que le vecteur d'état 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 en faveur du psi-epistemic-isme, c'est le postulat de la mesure et le fait qu'une mesure soit suivie du collapse du paquet d'onde vers un vecteur propre de l'opérateur mesuré. Cette règle du collapse fait penser à un conditionnement classique en théorie des probabilités ou à la règle de Bayes. On a du mal à imaginer que la réalité fasse effectivement collapser un champ quelconque quand on le mesure pour faire apparaître exactement le bon conditionnement. Un autre argument, qui est aussi avant tout un argument anti psi-ontic, est le fait que l'on ne peut pas connaître le vecteur d'état qu'un système avait avant une mesure⁸, on ne peut le connaître qu'après. On peut préparer un vecteur d'état donné mais pas déterminer un vecteur d'état d'un système inconnu, aspect qui semble encore une fois rapprocher le vecteur d'état plus du

8. C'est une conséquence du *no-cloning* theorem qui dit qu'il est impossible de cloner l'état d'un système quantique ce qui aurait permis, en faisant plein de clones, de mesurer exactement la fonction d'onde du système initial sans le perturber.

côté de l'observateur que de la réalité. Il existe néanmoins diverses preuves (voir notamment [7]) que le vecteur d'état doit au minimum contenir "un peu" de réalité et ne peut être entièrement épistémologique.

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.

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 [8, 6] pour un panorama). Il faut mentionner que l'interprétation officielle de la mécanique quantique (dite de Copenhague), ou du moins celle qui est largement majoritaire après avoir été l'unique est assez subtile de ce point de vue. L'interprétation de Copenhague est résolument opérationnaliste et affirme que la seule chose qui compte pour une théorie physique est de prédire les probabilités des résultats de mesure d'une expérience. Mais de manière plus subtile et a priori légèrement contradictoire, elle est aussi psi-ontic (ce fait n'est pas universellement accepté). C'est simplement que ce que l'école de Copenhague appelle "ontologie" est extrêmement faible. Dans l'interprétation officielle, le vecteur d'état contient toute l'information existante sur l'univers, tout ce qu'on peut en connaître, et il n'existe pas plus de réalité que cette connaissance même (on dit parfois pour caricaturer l'interprétation de Copenhague que la Lune n'existe pas quand on ne la regarde pas). L'école de Copenhague appelle alors *réalité* cet ensemble d'information sur le monde contenu dans le vecteur d'état car au fond il n'en existe pas d'autre. De la même manière, ceux qui pensent qu'il doit exister une réalité qui dépasse la mécanique quantique sont en général psi-epistemic parce qu'ils pensent que cette réalité qu'ils cherchent n'est pas dans le vecteur d'état qui n'en est qu'une description, fidèle ou non, ou qu'une partie (on peut citer l'interprétation de De Broglie-Bohm). Ce n'est néanmoins pas systématique et d'autres théories comme celles dites du *collapse objectif* (GRW, pour *Girardi-Rimini-Weber* ou CSL, pour *Continuous-Stochastic-Localization*) sont réalistes et donnent au vecteur d'état un statut de réalité au sens usuel du terme.

3.6 Le problème de la mesure

Les précédentes questions d'interprétations pouvaient sembler d'ordre uniquement philosophique et on peut se demander si elles affectent réellement le travail du physicien. Il existe cependant 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*. 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.

Rendons cette explication un peu plus précise en regardant comment on décrit en pratique une mesure (ou l'interaction entre un système et un environnement comprenant beaucoup de degrés de liberté) au niveau quantique⁹. On considère pour simplifier un système à deux niveaux $\mathcal{H}_s = \text{Vect}(|0\rangle, |1\rangle)$. On effectue une mesure en le couplant avec un appareil de mesure *macroscopique*, c'est à dire un système dont l'état appartient à un espace de Hilbert \mathcal{H}_m possédant un nombre très important de degrés de liberté (typiquement $2^{10^{23}}$). Ainsi, l'espace de Hilbert total s'écrit $\mathcal{H}_{tot} = \mathcal{H}_s \otimes \mathcal{H}_m$ et on va essayer de décrire une mesure du petit système par une évolution unitaire dans cet espace.

On suppose que le système est initialement dans une superposition quantique de 0 et 1 et que l'appareil de mesure va simplement mesurer la base canonique (i.e. 0 ou 1). L'état initial total s'écrit :

$$|\psi\rangle = \frac{|0\rangle + |1\rangle}{\sqrt{2}} \otimes |\phi\rangle$$

Ensuite le système total évolue avec une dynamique unitaire éventuellement compliquée mais qui couple au moins un peu le système et son appareil de mesure. Ainsi après un temps assez long, l'état total s'écrit :

$$|\psi\rangle = |0\rangle \otimes |\phi_0\rangle + |1\rangle \otimes |\phi_1\rangle$$

On peut donner un modèle précis d'évolution en spécifiant un Hamiltonien pour calculer exactement $|\phi_0\rangle$ et $|\phi_1\rangle$ mais ça n'est pas nécessaire. En effet, comme l'évolution couple le système et l'appareil de mesure, $|\phi_0^t\rangle$ et $|\phi_1^t\rangle$ vont avoir des évolutions différentes dans \mathcal{H}_m qui est, on le rappelle un espace de Hilbert de dimension astronomique. Initialement on a $|\phi_0^{t=0}\rangle = |\phi_1^{t=0}\rangle = |\phi\rangle$ mais ensuite les vecteurs vont avoir tendance à s'éloigner dans \mathcal{H}_m . Après un temps très long et une évolution quelconque, ces deux rayons de \mathcal{H}_m seront a priori complètement aléatoires. Le produit scalaire entre deux rayons aléatoires d'un espace de Hilbert de dimension N est d'ordre $\frac{1}{\sqrt{N}}$ et donc ici, pour quasi toutes les évolutions¹⁰, on a $\langle \phi_0 | \phi_1 \rangle \rightarrow 0$. On obtient ainsi que le couplage entre notre système quantique à deux degrés de liberté et un appareil macroscopique

9. Cette explication est souvent incluse dans ce qu'on appelle la théorie de la décohérence qui n'est pas vraiment une théorie au sens usuel du terme car elle n'ajoute rien au formalisme usuel. Elle tente simplement de l'utiliser pour expliquer pourquoi les cohérences quantiques disparaissent (ce qu'elle fait très bien, mais ce qui n'est pas tout à fait suffisant pour expliquer la mesure).

10. L'argument est effectivement légèrement imprécis, mais il est facile de le rendre quantitatif et rigoureux en explicitant le Hamiltonien du système complet. Simplement dans ce cas, on a tendance à se perdre dans les calculs et à ne pas comprendre la raison relativement simple qui fait que tout marche aussi bien.

avec un nombre important de degré de libertés a fait *décohérer* le système, c'est à dire a détruit toute la cohérence quantique qu'il pouvait contenir. La probabilité de mesurer 0 ou 1 vaut toujours $1/2$ mais la probabilité de mesurer $|+\rangle = \frac{|0\rangle + |1\rangle}{\sqrt{2}}$ est passée de 1 à $1/2$, il n'y a plus de cohérence, la superposition quantique *a désormais les mêmes propriétés qu'un mélange statistique*.

Une fois qu'on est arrivé là, on dit en général (abusivement) que le système a été mesuré car il se comporte comme si tel était le cas. En fait, on n'a fait que la moitié du chemin et pour avoir effectivement une mesure, il faudrait détruire entièrement cette superposition quantique (même si ses propriétés sont désormais uniquement classiques) et *choisir* une des deux possibilités, c'est à dire être en $|0\rangle \otimes |\phi_0\rangle$ ou $|1\rangle \otimes |\phi_1\rangle$, ce qu'aucune évolution unitaire ne peut faire. En effet, le principe de superposition (ou la linéarité de l'équation de Schrödinger) montre que les normes de $|\phi_0\rangle$ et $|\phi_1\rangle$ sont constantes, quoi qu'on fasse impossible de choisir avec une évolution unitaire. Tant qu'on en reste là, il est notamment possible de ramener l'état du système total de manière unitaire (car tout évolution unitaire est réversible) à son état initial c'est à dire de recréer de la cohérence là où il n'y en avait plus ce qui est évidemment impossible dans le cas d'une vraie mesure quantique telle que celle qui est décrite par le troisième postulat. On invoque en général un argument statistique, qui est qu'une telle évolution bien que possible est extrêmement improbable et que de la même manière qu'en physique statistique l'entropie n'augmente qu'en moyenne, ici la cohérence est détruite en moyenne pour une dynamique quelconque. On peut aussi remarquer que l'on n'a toujours pas choisi dans quelle base allait s'effectuer la mesure. On utilise en général l'argument d'*einselection* de Zurek [11] pour dire que la base mesurée doit correspondre à celle qui diagonalise le Hamiltonien de l'appareil de mesure en ajoutant encore un environnement qui fait décohérer l'appareil de mesure. Néanmoins, on ne pourra jamais faire formellement collapser à cause de l'argument précédent sur la constance de la norme de $|\phi_0\rangle$. Une autre manière de clore la discussion est de mesurer l'appareil de mesure avec une mesure de Von Neumann (i.e. avec le troisième postulat). Dans ce cas on n'a fait que reculer d'un cran le problème de la mesure et on se demande un peu où il faut s'arrêter. On a ainsi principalement deux (mauvaises) solutions au problème de la mesure, soit on admet qu'en pratique il faut faire fuir la chaîne de Von Neumann à l'infini et qu'une mesure n'a de sens que comme la limite (à préciser) d'une telle chaîne et dans ce cas la théorie quantique est intrinsèquement mal formulée, soit on doit utiliser un argument statistique pour préciser ce qu'est effectivement une mesure, mais dans ce cas la théorie quantique apparaît plus comme une théorie effective qu'une théorie fondamentale qui reste à trouver, comme la thermodynamique l'est de la physique statistique. Dans tous les cas, une évolution unitaire seule est incapable de reproduire le postulat de la mesure, quelle que soit la complexité du système ou de l'évolution considérés (voir [1] pour une preuve précise). Ce problème n'a pas, que je sache, d'autre solution à l'intérieur de la physique quantique et c'est la recherche d'une meilleure explication qui motive principalement les travaux actuels sur les fondements. Si la mécanique quantique apparaît incompréhensible, c'est ainsi en partie parce qu'elle contient intrinsèquement une difficulté d'interprétation du formalisme qui n'est pas uniquement d'ordre philosophique et qui n'est qu'empiriquement, mais pas rigoureusement, réglée. Comprendre la mécanique quantique c'est aussi savoir où il reste d'irréductibles flottements.

4 Les interprétations (et modifications) de la mécanique quantique

Il n'est pas évident de résumer en quelques lignes les nombreuses interprétations ou extensions qui existent de la mécanique quantique et qui prétendent apporter une solution soit au problème philosophique de la réalité soit au problème plus physique de la mesure. Cette recherche d'interprétations ou d'extensions de la théorie quantique est souvent motivée aussi par la volonté d'obtenir une meilleur base pour la quantification de la gravité (même si encore une fois rien ne prouve rigoureusement que ce soit nécessaire). Enfin, certaines extensions prédisent des comportements légèrement différents de la mécanique quantique à certaines échelles (notamment une rupture de la linéarité) qui rendraient en fait théoriquement inatteignables de nombreux objectifs actuels de la recherche technologique dans le domaine, en particulier celle qui concentre le plus d'efforts aujourd'hui : la quête de l'ordinateur quantique universel. Ainsi il y a de nombreuses motivations à la recherche de fondements ou d'interprétations de la mécanique quantique, qui sont d'ordre philosophique (la quête de la réalité), logique (la quête de la cohérence de la théorie), physique (la quête de l'unification avec la gravité) et même technologique (la quête du calcul quantique).

4.1 Copenhague extrémiste

Le rôle de la conscience et l'interprétation de Wigner. Limite à la connaissance physique de la conscience elle-même.

4.2 Logique ou théorie des probabilités alternative

Je caricature un peu, mais c'est la position de gens comme Zeilinger.

4.3 La théorie de l'onde pilote de Broglie-Bohm

La théorie de l'onde pilote permet de récupérer la réalité. Elle fournit exactement les mêmes prédictions que la mécanique quantique mais en offre en plus une réalité sous-jacente non locale au prix d'une complexification significative de la théorie. Ses prédictions ne sont pas distinguables de la théorie quantique traditionnelle et en ce sens, être "Bohmien" est un choix essentiellement subjectif, dicté par une préférence pour la cohérence logique et la réalité et une acceptation de la complexification mathématique. Elle possède aussi comme caractéristique significative d'être déterministe (l'aléatoire vient d'une méconnaissance des conditions initiales) ce qui prouve encore une fois que le théorème de Bell ne dit rien sur l'indéterminisme intrinsèque supposé de la nature.

– Difficultés pour écrire la théorie de manière manifestement covariante. (même si la solution a je crois plus ou moins été trouvée dans des papiers que personne n'a du lire).

– Les seules propriétés objectives de la matière sont les positions des particules. Les autres observables n'en sont que des fonctions ou des propriétés émergentes.

Dans la classification précédente, la théorie de l'onde pilote est réaliste et psi-epistemic.

4.4 La théorie des multimondes d'Everett

La théorie des multimondes¹¹ d'Everett est l'interprétation la plus populaire de la mécanique quantique dans la littérature grand public (avec le classique "La matière est en fait une onde, et puis c'est tout"). C'est aussi l'interprétation qu'utilisent en pratique un grand nombre de physiciens (même opérationnalistes) lorsqu'ils cherchent à appuyer leur intuition sur un support réaliste, sans forcément l'avouer. Parce qu'elle est assez séduisante pour le grand public et qu'elle est un bon support pour l'intuition de physiciens en manque de réalisme, l'interprétation d'Everett est bien plus populaire que ce que sa faible cohérence interne et son impossible formalisation précise ne devraient lui permettre de mériter. L'idée est assez simple, on supprime le problème de la mesure en décrétant qu'il n'y a en fait jamais de *collapse*. Toutes les possibilités permises par le vecteur d'état sont effectivement réalisées mais dans des univers différents. Le problème de la mesure venait du fait qu'il fallait briser la superposition à un moment, la solution est ici de ne jamais la briser et de laisser tous les résultats coexister. La séquence de résultats de mesure que l'on observe pour une expérience est par exemple différente dans les autres univers et toutes les séquences permises sont représentées.

L'intérêt majeur de cette interprétation est de fournir une ontologie à l'intégrale de chemin de Feynman, c'est à dire une forme de réalité aux trajectoires quantiques. Le défaut principal est que l'on doit créer de nouveaux univers à chaque fois qu'il y a une mesure. Ces univers parallèles ne sont pas virtuels, il faut qu'ils existent vraiment et interfèrent entre eux pour que la théorie ait du sens. On crée ainsi à chaque instant une infinité continue de nouveaux univers ce qui n'est pas très parcimonieux pour une théorie physique. Dans la classification précédente, la théorie est évidemment réaliste (simplement la réalité a vu sa taille exploser). Elle est aussi plutôt psi-ontic dans la mesure où le vecteur d'état représente une configuration objective des univers.

Les théoriciens qui défendent cette approche se cachent et je ne sais pas bien qui est aujourd'hui le leader de cette interprétation. La théorie des multimondes est un peu comme le magasine *Closer* posé sur la table basse du salon : tout le monde le lit avec plaisir mais personne n'osera avouer qu'il l'a acheté.

4.5 Les théories du collapse objectif

L'idée des théories du collapse objectif [2] est de prendre au sérieux le vecteur d'état en lui donnant une réalité physique indépendante de l'observation. Les théories du collapse objectif suppriment le postulat 3 et cherchent ensuite à résoudre le problème de la mesure en modifiant très légèrement l'équation de Schrödinger (c'est à dire l'évolution unitaire) en y ajoutant un terme stochastique et non linéaire. On a vu que la théorie de la décohérence seule était incapable de résoudre complètement le problème de la mesure car il fallait bien faire s'arrêter la chaîne de Von Neumann à un moment de manière arbitraire car le postulat 3 (de la mesure) ne pouvait pas se déduire uniquement du postulat 2 (évolution unitaire). C'est exactement ce problème que les théories du

11. Attention, cette théorie n'a aucun rapport avec la théorie du multivers, le problème du "String Landscape" et l'argument "anthropique" principalement portés par Leonard Susskind en théorie des cordes. Dans les deux cas on fait appel à l'existence de nombreux univers mais pour régler des problèmes complètement différents.

collapse objectif permettent de résoudre. En modifiant l'évolution unitaire, elles permettent de dériver le postulat de la mesure de manière effective dans la limite où un système interagit avec un système macroscopique possédant beaucoup de degrés de liberté. La première théorie cohérente (au sens logique) de ce type est la théorie GRW (Girardi, Rimini et Weber). Elle dit simplement qu'un degré de liberté isolé a tendance à collapser tout seul même sans mesure ce qui ajoute un petit terme stochastique à l'évolution unitaire usuelle. Ce terme est minuscule car le collapse spontané est très rare, ce qui implique que les observations que l'on fait sur des atomes uniques ou de petits systèmes sont quasi identiques aux prédictions faites par la mécanique quantique et en tout cas conforme à ce que l'on observe aujourd'hui dans les expériences. Pour un système avec de nombreux degrés de liberté couplés, les collapses arrivent beaucoup plus souvent de sorte qu'un appareil de mesure voit constamment une quantité importante de ses degrés de liberté projetés. On peut montrer (mathématiquement) que l'on obtient ainsi de manière effective le collapse quasi total du paquet d'onde d'un système couplé avec un appareil de mesure : on a dérivé le postulat de la mesure de l'évolution du vecteur d'état, l'observateur n'est plus nécessaire. D'autres théories, regroupées sous le nom de CSL (pour continuous stochastic collapse) remplacent ce collapse rare mais brutal d'un degré de liberté unique par un collapse progressif, toujours faible mais d'amplitude constante dans le temps. On obtient alors des résultats identiques à GRW sans discontinuité dans les équations.

Dans la classification précédente, les théories du collapse objectif sont donc à la fois réalistes 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 n'est qu'approximative et posent ainsi d'importantes limitations pour la réalisation d'un ordinateur quantique avec un nombre arbitrairement grand de q-bits.

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. 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.¹²

Les théoriciens actuels qui défendent cette approche sont principalement GianCarlo Girardi, Angelo Bassi, David Albert, Roderich Tumulka.

4.6 Les théories exotiques

- Automate cellulaire de 't Hooft [9]
- Histoires décohérentes, Gell-Mann, Omnes, Hartle

4.7 Pragmatisme ou agnosticisme quantique

Howard Wiseman

12. 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.

5 Conclusion

5.1 Résumé du schéma logique

La théorie quantique est une théorie générale de la prédition qui ne parle pas de la réalité ce qui rend sa compréhension au sens traditionnel du terme assez difficile. En effet, comprendre signifie souvent savoir ce qui se passe au niveau de la réalité, même quand on ne mesure pas. Bien sûr, il n'est pas interdit de se poser des questions sur la réalité sous-jacente aux mesures que l'on observe et aux probabilités que la théorie prédit, mais la théorie quantique elle-même ne fournit pas de réponse. Même si elle est légitime (ce qui est parfois, à mon avis injustement contesté) cette recherche de la réalité n'est pas évidente à cause du théorème de Bell qui met des contraintes très fortes sur ce qui peut jouer le rôle de réalité. Notamment, la réalité doit être non locale, c'est à dire que la vision naïve d'une réalité constituée d'une substance (locale) n'est pas tenable à cause principalement de l'intrication. Le vecteur d'état lui-même pourrait être un candidat crédible à cette pseudo-réalité non locale, mais son comportement vis à vis de la mesure fournit une image de la réalité un peu contre-intuitive et mystique *qui n'est pas inévitable*. Le postulat de la mesure contient en outre une réelle imprécision sur la séparation qui doit exister entre classique et quantique, microscopique et macroscopique. La théorie de la décohérence ne répond que partiellement à ce problème et doit être complétée d'arguments statistiques ou de passages à la limite dans les deux cas très heuristiques. Si le problème de la réalité n'est qu'une difficulté avant tout philosophique de la théorie quantique et de son interprétation dominante, le problème de la mesure pose des obstacles logiques et a minima de précision du langage. Des interprétations différentes de la mécanique quantique ou même des extensions possédant de petites différences avec elle permettent de résoudre séparément ou en même temps ces deux problèmes. Le prix à payer est soit l'ajout d'autres difficultés conceptuelles, soit une complexification importante des équations.

5.2 Par honnêteté, mon avis

Jusqu'à maintenant, l'exposé est resté je le crois relativement neutre, même si je n'ai qu'imparfaitement caché ma conviction de la légitimité de la quête de la réalité (pour compenser on peut lire Michel Bitbol [3]). Si je donne désormais mon avis de manière plus précise, ça n'est pas parce que je considère qu'il a une quelconque importance ni que je constitue un exemple crédible à suivre, je cherche à permettre au lecteur de voir ce que l'exposé précédent pourrait avoir d'involontairement biaisé. C'est aussi un moyen de montrer mon absence totale de certitude sur le sujet et l'extrême volatilité de ma compréhension de la théorie : au minimum cela devrait permettre de décomplexer le lecteur.

Tout d'abord, je ne suis pas convaincu par l'interprétation de Copenhague (voir [4] pour une critique plus détaillée). L'interprétation de Copenhague se défend. Ce peut être un choix faute de mieux. Mais il est plus gênant de voir beaucoup de gens prétendre qu'il est absolument exempt de problèmes logiques (à moins d'adopter l'interprétation de Wigner qui me semble être la seule absolument cohérente même si elle est inacceptable) qu'il serait en tout cas inutile d'essayer de résoudre. On peut donner, je pense, assez facilement les raisons du succès de cette interprétation pour se convaincre qu'elles n'ont pas toutes la lé-

gitimité de la science. L'interprétation de Copenhague est apparue à un moment où la philosophie était aussi très favorable, avec la phénoménologie (et dans une certaine mesure le positivisme), à la mise de l'observateur au centre de l'attention. Plus tard, c'est probablement le théorème de Bell, pourtant démontré par un réaliste qui cherchait à préciser ce que l'on pouvait espérer, qui a servi de justification abusive de l'impossibilité d'une interprétation alternative. Ce résultat étant acquis pour la plupart des philosophes, la théorie quantique dans son interprétation dominante a irrigué pour le meilleur comme pour la pire la philosophie continentale. Ses flottements logiques et son côté un peu ésotérique ont ensuite servi de caution au post-modernisme pour mettre la science sur le même plan que la littérature, comme une autre construction sociale. La théorie quantique n'est évidemment pas responsable de certains errements du post-modernisme, mais les disciples de Bohr lui ont sans conteste donné des armes qu'il ne méritait pas. En échange la philosophie a tout signé sans regarder les petites écritures en bas du contrat. Le succès de l'interprétation de Copenhague s'explique à mon avis aussi pour des raisons Darwiniennes. Je donne évidemment ici un peu dans l'épistémologie de comptoir. L'interprétation de Copenhague a été très efficace au départ car en éliminant les questions d'interprétation et en ne gardant que le formalisme mathématique, elle a permis le "shut up and calculate" de Mermin. Les physiciens qui ont ainsi été les plus productifs au départ ont été ceux qui essayaient d'extraire le maximum des équations sans s'embourber dans des interprétations que l'on jugeait fumeuses. La sélection Darwinienne a ainsi permis de filtrer petit à petit ceux qui doutaient encore. Fermer les yeux sur les imprécisions logiques manifestes posées par l'interprétation de Copenhague a été en fait un avantage évolutif important dans la communauté des physiciens.

Je ne critique l'interprétation dominante que parce que je crois son hégémonie imméritée. J'ai de mon côté beaucoup changé d'avis. J'ai toujours été réaliste en étant d'abord psi-ontic naïf, c'est à dire en voyant la fonction d'onde comme la réalité diffuse de la matière. C'est une caractéristique que partagent la majorité des gens qui ont appris la mécanique ondulatoire avant le formalisme moderne des espaces de Hilbert. C'est quand on se rend compte plus tard qu'à cause du postulat de la mesure, la fonction d'onde n'est pas un champ comme les autres que l'on adopte en général la position exactement opposée. J'ai ensuite été naturellement psi-epistemicist, abandonnant entièrement le vecteur d'état et en espérant qu'il existe quand même une machinerie complexe, type automate cellulaire de 't Hooft permettant de construire une réalité éventuellement loin de notre échelle. Enfin, en étudiant les équations de mesures répétées à la limite continue, je me suis rendu compte par hasard qu'on devait pouvoir trouver une solution au problème de la mesure en les prenant non comme des équations effectives mais comme des équations fondamentales remplaçant l'équation de Schrödinger. J'ai en fait retrouvé sans le savoir une des nombreuses théories du collapse objectif, inventées presque 30 ans plus tôt. Comme je suis tombé dessus presque involontairement et que je les trouvais séduisantes avant même de savoir qu'elles avaient en fait déjà été étudiées en détails (on a désormais intégré la théorie des champs à certaines théories), j'ai aujourd'hui une préférence très marquée pour les théories du collapse objectif et j'attends avec impatience qu'elles soient testées expérimentalement. D'un point de vue philosophique, je trouve ces théories attrayantes car elles suppriment le caractère un peu mystique de l'influence de la mesure sur le système en expliquant comment se fait précisément cette influence. En levant le voile sur le mécanisme elles suppriment

sa magie et révèlent l'illusion. Ces théories conservent l'intrication sans rien y changer et gardent ainsi à cette subtilité de la physique toute sa clarté formelle. Elles mettent ainsi l'accent sur la spécificité démontrée de la nature et de la théorie quantique, i.e. la non localité, au dépend d'une caractéristique à mon avis secondaire (et très mal interprétée) qu'est l'influence irréductible de la mesure. Évidemment, les théories du collapse objectifs possèdent plein de défauts notamment leur complexité mathématique. On leur oppose ainsi en général l'argument du rasoir d'Occam, c'est à dire le fait que la théorie quantique standard étant plus simple mathématiquement, c'est celle qui est à privilégier tant que l'expérience n'a pas pu discriminer. Cet argument a de la valeur mais j'ai tendance à trouver le rasoir d'Occam philosophique plus crédible et moins entaché de subjectivité que le rasoir d'Occam mathématique. En effet, les théories du collapse objectif sont certes plus compliquées mathématiquement, mais elles sont incroyablement plus simples philosophiquement et ne nécessitent pas vraiment d'interprétation. Elles vident de la théorie quantique tout ce qu'elle a de mystique dans son interprétation orthodoxe¹³. Pour reprendre le vocabulaire de Bell, ces théories enlèvent de la mécanique quantique son romantisme ce qui est plutôt une bonne chose (voir [10]). Je dois ajouter que je connais moins bien les autres interprétations et que par conséquent je ne leur rend probablement pas justice.

Si je ne suis que depuis peu de temps un adepte des théories du collapse objectif, j'ai toujours été plus ou moins réaliste sans trop savoir pourquoi. Je pense que la science a besoin d'une forme de réalité pour avancer, ne serait-ce que pour y appuyer son intuition. Le problème est qu'aujourd'hui tout le monde est officiellement opérationnaliste, en public, et réaliste dans le secret de son esprit. J'ai récemment entendu deux physiciens théoriciens réputés parler à un mois d'intervalle de "*mesure de Dieu*" et "*d'observateur omniscient*". C'est évidemment une manière à peine voilée de parler de réalité sans se l'avouer dans un langage opérationnaliste. Ce type de problème arrive de plus en plus car les questions d'estimation optimale pour des systèmes quantiques sont à la mode. On essaie d'estimer avec précision l'état d'un système en le mesurant faiblement avant et après l'instant d'intérêt, instant où le système n'est éventuellement pas mesuré. Le problème c'est que pour savoir si une estimation est fidèle ou optimale, il faut savoir à quelle réalité indépendante de l'observation la comparer. On utilise alors comme ontologie très imparfaite les trajectoires quantiques¹⁵ engendrées par la mesure de cet hypothétique observateur omniscient. On a dit si longtemps qu'il ne fallait pas parler de réalité, que lorsque l'on en a besoin, on est obligé de faire de terribles contorsions et d'adopter un formalisme que l'on sait pourtant inadéquat. Il est évidemment probable que toute la littérature qui mentionne les observateurs omniscients fournit des résultats corrects, mais ce langage est à mon avis révélateur d'un problème majeur : on n'a pas assez pensé la réalité.

13. C'est d'ailleurs peut-être cette raison qui pousse certains physiciens à conserver l'orthodoxie.

14. C'est ici évidemment le même Dieu que dans le "Dieu ne joue pas aux dés" d'Einstein, sans connotation religieuse. On peut ici sans problème remplacer Dieu par Nature par exemple.

15. Trajectoires dont je n'ai pas parlé ici. Il faut simplement préciser que si ces trajectoires quantiques sont engendrées par une mesure effectivement réalisée, alors elles ont un caractère objectif. En l'absence de mesure (ou pour une mesure de "Dieu" jamais lue), il existe une infinité d'ensembles statistiques de trajectoires quantiques possibles pour décrire un système.

Remerciements

Denis, Irénée, Thomas, Tom

Références

- [1] Angelo Bassi and GianCarlo Ghirardi. A general argument against the universal validity of the superposition principle. *Physics Letters A*, 275(5) :373–381, 2000.
- [2] Angelo Bassi and GianCarlo Ghirardi. Dynamical reduction models. *Physics Reports*, 379(5–6) :257 – 426, 2003.
- [3] Michel Bitbol. *Mécanique quantique : une introduction philosophique*. Flammarion-Pere Castor, 1996.
- [4] Jean Bricmont. Contre la philosophie de la mécanique quantique. *Les sciences et la philosophie. Quatorze essais de rapprochement*, Vrin, Paris, 1995.
- [5] Jean Bricmont, Hervé Zwirn, and Thierry Martin. *Philosophie de la mécanique quantique*. Vuibert, 2009.
- [6] T. Norsen and S. Nelson. Yet Another Snapshot of Foundational Attitudes Toward Quantum Mechanics. *ArXiv e-prints*, June 2013.
- [7] Matthew F Pusey, Jonathan Barrett, and Terry Rudolph. On the reality of the quantum state. *Nature Physics*, 8(6) :475–478, 2012.
- [8] M. Schlosshauer, J. Kofler, and A. Zeilinger. A Snapshot of Foundational Attitudes Toward Quantum Mechanics. *ArXiv e-prints*, January 2013.
- [9] 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.
- [10] Roderich Tumulka. The 'unromantic pictures' of quantum theory. *Journal of Physics A : Mathematical and Theoretical*, 40(12) :3245, 2007.
- [11] Wojciech Hubert Zurek. Decoherence, einselection, and the quantum origins of the classical. *Rev. Mod. Phys.*, 75 :715–775, May 2003.