

Théorie Générale du Sens et Physique Quantique

Matthieu Guillermin

30 Juin 2009

1 Introduction

Le but de cette communication est de mettre en évidence le parallèle entre la structure épistémologique de la physique quantique et la structure de la théorie globale du sens. Il me paraît fondamental pour les travaux du Groupe Béna d'accéder à la vue la plus large possible de l'objet de nos recherches. Je vais donc exposer dans la suite les éléments me poussant à affirmer que la TGS et la Physique Quantique présentent une structure similaire. Cela laisse entrevoir la perspective que la Théorie quantique trouve naturellement sa place au sein de la TGS et donc l'espoir d'une confirmation de nos travaux ainsi que le défrichage possible de points de contact vers les communautés scientifiques dites « dures ».

Ce texte est le développement de l'exposé de cette problématique que j'ai présenté lors de la réunion du Groupe Béna le 27 Juillet 2008. Je vais donc reprendre la structure de cette présentation en y incluant le développement d'une partie d'une autre communication sur les corrélations quantiques présentée lors de la réunion du groupe le 04 Avril 2008. Dans un premier temps, j'aborderais la notion d'objet possédant des propriétés intrinsèques, qui est un des éléments caractéristiques de la « pensée classique » en montrant les limites et les connexions avec les « objets » de la physique quantique. Cela permettra une première discussion des rapports avec la TGS à travers les différents débogages.

Cette première analyse effectuée, je m'appuierais sur une partie des développements de M. Bitbol pour mener une réflexion sur l'un des principes qui sous-tend la conception « classique » des objets et de leurs propriétés : le principe de bivalence. Directement issu de la logique aristotélicienne (principe de non-contradiction), il stipule que toute proposition est soit vraie soit fausse.

A la suite de M. Bitbol [1], j'exposerais sa mise en défaut dans le cadre de la physique quantique. Ce paragraphe sera aussi l'occasion d'exposer quelques principes fondamentaux de la théorie quantique que je réutiliserais par la suite.

J'aborderais alors un des éléments qui forment la base et l'originalité de

la mécanique quantique, à savoir le fait que tout « objet » est défini en référence à un contexte physique qui est explicitement reconnu et traité par le formalisme de la théorie. Il sera possible ici de mettre en résonance la nécessité d'un contexte pour que la notion de « propriété d'un système mesuré » aie un sens au sein de la physique quantique avec le principe d'émergence d'un référent autorisant la discrimination entre deux termes d'une alternative « préalablement » indécidables de la TGS.

Je montrerais enfin que la structuration liée au contexte est une logique que l'on retrouve à la fois dans la physique quantique (dont elle est le noyau fondamental) et dans la TGS (à travers le principe d'émergence ou de débogage). L'on pourrait quasiment ici dire que la TGS est bâtie sur le même fondement que la théorie quantique mais que sa portée est infiniment plus large. En effet, la TGS prend pour hypothèse de base explicite les principes (longtemps restés obscurs et implicites) à l'origine de la physique quantique, se laissant ainsi la possibilité de les appliquer à n'importe quelle démarche de connaissance alors que la théorie quantique se limite à l'application de cette structuration logique dans le cadre des sciences de la matière.

2 Objets et propriétés intrinsèques

Commençons ici par une rapide analyse des objets que nous manipulons à travers le filtre de la physique classique, qui sont les mêmes que les objets de la vie quotidienne de tout un chacun. Nous avons l'habitude de voir des objets qui existent par eux-mêmes, il ne nous viendrait pas vraiment à l'idée de nous demander si le réfrigérateur de notre cuisine continue à exister lorsque nous sommes au salon ou même absent de notre domicile. De plus, nous associons sans arrières pensées des propriétés aux objets qui nous entourent. Par exemple, notre réfrigérateur est blanc, a une capacité d'un m^3 , trois rayons et un bac à légume. Dans le champ de la physique, nous définissons un objet avec une vitesse, une position, une trajectoire et ainsi de suite . . . Cette habitude, cette façon de fonctionner et de définir conduit naturellement à la vision d'un monde extérieur à (et indépendant de) l'observateur, que ce dernier peut mesurer ou non.

Les « objets » de la physique quantique (de façon caricaturale, les objets infiniment petits) s'avèrent relativement résistants à ce type de conception de leur nature et des propriétés qu'on leur associe. Il est plus difficile de leur accorder le statut d'objet extérieur et indépendant de l'observateur. Un premier indice de cela est que les objets microscopiques sont, par définition, trop petit pour être observable directement. Pour percevoir ce type de phénomènes, nous sommes forcés d'utiliser des outils perfectionnés qui nous ouvrent les portes du monde microscopique. Le prix à payer pour cela n'est néanmoins pas nul. Toutes nos observations deviennent alors indirectes. Un instrument doit être utilisé pour relayer ou traduire les observations sur les

objets microscopiques de l'échelle de l'infiniment petit qui se dérobe à nos sens vers l'échelle macroscopique de la vie quotidienne. Bien que cette nécessité introduise une barrière entre le phénomène observé et l'observateur, nous pouvons tout de même tenter d'extrapoler notre façon de concevoir les objets qui nous entourent et la projeter sur ces objets même si nous ne pouvons les voir qu'indirectement.

Les développements de la mécanique quantique ont montrés que la validité de cette extrapolation était limitée. Nous y reviendrons plus loin dans le texte, mais nous pouvons d'ors et déjà affirmer que la conception du monde et des objets comme extérieurs à l'observateur et indépendants de celui-ci n'est pas la règle dans le monde quantique, mais plutôt le cas particulier, voire l'exception. De façon générale, le physicien quantique évite de parler d'objet possédant des propriétés intrinsèques même si parfois (ou souvent) pour des raisons pratiques (avec approximation explicite et valable) ou par habitude il s'y laisse aller. Pour rester fidèle à ce que nous dit la physique quantique sur le monde, nous devrions limiter le discours sur les « objets » microscopiques au constat du changement d'état d'un appareil de mesure reflétant l'occurrence d'un phénomène particulier que nous pouvons définir en fonction des caractéristiques de l'appareil de mesure. Nous pouvons par exemple dire que l'un des grains d'une plaque photographique a réagi lorsqu'il a été mis en présence d'un matériau radioactif. Dire qu'une particule a frappé la plaque en la faisant réagir paraît sensé mais n'est pas une conséquence de la théorie. Ce propos est plutôt une interprétation liée à l'hypothèse ajoutée que cette particule existe (au sens classique d'un objet ayant des propriétés telles qu'une vitesse, un position ou une trajectoire) en dehors de toute interaction avec un instrument de mesure qui permet sa manifestation. En toute rigueur, la physique quantique suspend son jugement de façon explicite quand à l'existence (au sens classique) de cette particule sans structure de mesure. Relayer ici la théorie et faire l'hypothèse que la particule existe s'avère souvent valable, mais conduit parfois à des paradoxes insolubles et à des erreurs d'interprétations.

En toute généralité, cette hypothèse d'existence (toujours au sens classique) ne se vérifie pas. Elle n'est en réalité valide que dans certains cas particuliers. Ce constat a conduit un des pères fondateurs de la mécanique quantique, Niels Bohr, à formuler en 1923 le principe dit « de correspondance » qui indique que la mécanique quantique se ramène aux conceptions classiques sous certaines conditions particulières que nous aborderons plus bas. Cela fait de la physique classique un champ particulier très bien délimité de l'ensemble plus général qu'est la théorie quantique. La physique classique n'est pas fausse, mais n'est pas la conception la plus générale et la plus globale que l'on a des sciences naturelles. Pris dans l'autre sens, ce principe de correspondance indique que sous certaines conditions bien définies, certains objets quantiques peuvent être pensés en termes classiques. C'est le constat de l'efficacité des théories « classiques » dans l'explication

des phénomènes macroscopiques qui motiva initialement la formulation de ce principe. D'après Bohr, « la mécanique classique doit se retrouver, comme approximation de la mécanique quantique pour des objets plus gros ».

Plus précisément, cette « approximation » pourra être appliquée lorsque le nombre d'occurrences du phénomène observé est grand ou quand l'action mise en jeu est importante devant la constante de Planck. En particulier, Ehrenfest (1927) montra que les valeurs moyennes des observables quantiques associées à la position et à la quantité de mouvement d'un système vérifiaient les équations de la mécanique classique. De façon générale, les mesures de variables d'un système classique correspondent aux valeurs moyennes des observables quantiques associées. Ceci revient à dire que l'on peut appliquer les conceptions classiques dans la mesure où l'on ne cherche pas à porter un regard trop acéré sur les phénomènes observés (en particulier si l'on ne tente pas de saisir ceux-ci avec une extension spatiale et temporelle trop réduite). Même si l'on réduit le passage du domaine quantique au domaine classique à un passage du monde microscopique au monde macroscopique, cette transition implique la définition et l'utilisation de la notion valeur moyenne d'observables (sur un grand nombre d'occurrences ou pendant un laps de temps important).

La notion de valeur moyenne d'une observable ainsi que l'action de l'expérimentateur qui mesure une grandeur lui correspondant présuppose l'acceptation (au niveau mental) et la validité (au niveau physique) de plusieurs degrés de « stabilité » des phénomènes. Il est en effet nécessaire de dire à quel endroit (dans quel volume) et pendant quelle durée est effectuée la moyenne, c'est à dire d'avoir une référence spatiale et temporelle. D'autre part, il est indispensable de considérer que chaque unité de mesure représente en toute situation la même « quantité de phénomène », ce qui correspond à une référence d'interaction. Enfin, on doit pouvoir dire sans ambiguïté si un événement s'est produit. On peut qualifier cette dernière contrainte de référence de manifestation. Ces trois éléments semblent entrer aisément en résonance avec les notions de débogages de la TGS associés à une complexification et une diversification croissante de l'univers et de la communication qui s'y tient. Nous pouvons constater que pour rendre compte de la continuité entre le monde quantique et le monde classique, la physique utilise implicitement des notions supposées claires et facilement distinguables comme l'espace, le temps, l'interaction et la manifestation que l'on retrouve comme moelle épinière de la Théorie Globale du Sens. Le monde classique correspondrait alors au monde triplement débogué de la TGS.

3 Débogage et opération logique de disjonction

Réalisons ici un petit détour par l'analyse de la notion de débogage pour tenter de proposer une manière de la formuler logiquement. La notion de débogage que nous employons dans nos travaux me semble intimement liée à la notion logique du « OU exclusif », que l'on note « \vee ». De façon plus précise, dire qu'un débogage est effectif sur un élément (une grandeur, une propriété, etc. ...) revient à pouvoir distinguer les différentes alternatives relatives à cette grandeur ou cette propriété. Une façon de réaliser cette distinction est de supposer que l'opération logique de disjonction (ou exclusif) est applicable aux différentes alternatives. Si l'on a, par exemple, une propriété décrites par trois alternatives possibles A, B ou C, un débogage de cette propriété correspond à pouvoir associer l'un (et un seul) des termes (A, B ou C) à l'objet. Cela nécessite de pouvoir utiliser l'opération de disjonction entre ces trois alternatives. Si l'objet a la propriété A, il ne peut avoir la valeur B ou la valeur C. Les propositions : « l'objet est A », « l'objet est B » et « l'objet est C » sont contradictoires prises deux à deux.

Si l'on prend l'exemple du temps, parler de débogage revient à pouvoir dater les événements. Pour ce faire, l'opération de base consiste à choisir un repère et à déterminer si un événement quelconque s'est produit avant, après ou en même temps que ce repère. Mais si on dit que le temps est débogué, l'événement à dater ne peut se produire avant et après et en même temps. On doit pouvoir employer un OU exclusif entre les différentes alternatives associées au repérage d'un événement dans le temps. Le débogage spatial pourrait être formulé de la même façon en disant que l'on doit avoir un OU exclusif entre les positions possibles d'un objet par rapport à un point de repère : plus haut OU plus bas, plus à gauche OU plus à droite, pile sur le repère, etc ...

Finalement, dire que la « grandeur » temps est déboguée revient alors à pouvoir affirmer qu'un événement s'est produit à telle date OU à telle autre date. Ce débogage peut alors s'exprimer comme une relation d'ordre qui permet de discerner les différents instants. Le débogage associé à l'espace permet de dire que telle chose s'est déroulée ici OU là. De même pour le couple contenu - contenant (compréhension - extension). On déterminera alors si un élément est contenu dans un autre OU bien s'il le contient. Ce type de débogage (possibilité d'appliquer l'opération de disjonction) est un élément premier pour pouvoir associer une propriété à un objet. Pour dire qu'un objet à une couleur, il faut pouvoir affirmer qu'il est bleu OU qu'il est rouge et l'on doit pouvoir faire la disjonction entre les différentes couleurs (c'est à dire entre les différents éléments caractérisant la propriété). De même, pour donner la masse d'un corps, il faut pouvoir distinguer 15 kg OU 20 kg.

Ce dernier point concernant le « OU exclusif » met en évidence la relation entre la notion de débogage, la validité de l'opération logique de disjonction et le fait de dire qu'un objet possède une propriété. Une telle hypothèse cor-

respond à admettre le « principe de bivalence » [1] aussi appelé « principe de contradiction » proche cousin du « principe du tiers exclu », pierre angulaire de la théorie de la science aristotélicienne [2]. A l'inverse, si le débogage n'est pas effectif, on ne peut faire correspondre à l'objet une alternative particulière car la structuration du discours basée sur l'opération de disjonction n'est pas adaptée à la description du phénomène. Nous allons voir, à travers un exemple concret de la physique, qu'il n'est parfois pas valide d'utiliser le OU exclusif entre différentes alternatives. Cela revient à montrer l'absence de validité du principe de bivalence.

4 Le principe de bivalence remis en question ?

Il est donc nécessaire de préciser maintenant ces principes. Le principe de bivalence stipule que : *Quelle que soit la proposition p , p est soit vraie soit fausse* [1]. Ce qui peut encore se traduire par : *Quelle que soit la proposition p , soit p est vraie et non- p est fausse, soit p est fausse et non- p est vraie* ainsi que par : *Quelle que soit la proposition p , (p ou non- p) est toujours vraie* [1]. Le principe du tiers exclu s'exprime sur un plan plus « technique » et indique que du point de vue de la logique formelle : *Quelle que soit p , $(p \vee \neg p)$ est une formule bien formulée* (avec $\neg p$ correspondant à non- p).

Nous avons vu au paragraphe précédent que l'emploi de ce principe était intimement lié à la possibilité de définir et distinguer deux alternatives (principe du débogage) ainsi qu'au fait d'accorder à un objet des propriétés intrinsèques. Nous allons, dans cette section, examiner le statut et la validité de ce principe de bivalence lors de son éventuelle application aux objets de la physique quantique en nous appuyant sur les développements exposés par M. Bitbol [1]. Ceci est intéressant car, comme nous l'avons rappelé précédemment, les objets du domaine quantique semblent résister à la conception d'objet possédant des propriétés intrinsèques. De plus, nous avons montré que la physique quantique pouvait se ramener à la physique classique dans le cas des grands nombres quantiques (en caricaturant, on dirait : dans le cas des systèmes macroscopiques). Dans le domaine classique, la conception d'un objet possédant des propriétés intrinsèques ne pose aucun problème. En suivant la transition entre la physique classique et la physique quantique, nous pouvons donc espérer isoler un mécanisme, une transition de la modalité du raisonnement correspondant à une sorte de débogage.

Nous allons tout d'abord mettre en évidence le lien entre les objets quantiques et le principe de bivalence. Il est important de rappeler ici que la physique quantique est un formalisme permettant d'évaluer la probabilité d'occurrence de tel ou tel événement [1, 3]. Expérimentalement, cette théorie ne se teste jamais sur des cas isolés mais bien sur un large ensemble de mesures identiques. Ce n'est pourtant pas cet aspect de la théorie qui

en fait un cadre fondamentalement nouveau par rapport à la physique classique, mais ce sont plutôt, de notre point de vue, les limites de la validité du principe de bivalence qui entraîne une telle rupture.

En effet [1], le calcul classique des probabilités (kolmogorovien) est basé sur la validité universelle du principe de bivalence. Si l'on considère deux événements r et s , l'application du principe de bivalence fait de $(s \vee \neg s)$ une tautologie. Cette proposition est toujours vraie et recouvre la totalité de l'ensemble des événements. Si l'on désigne par $P(r)$ la probabilité de l'événement r , on peut écrire (en notant l'opération de conjonction « \wedge ») :

$$P(r) = P(r \wedge (s \vee \neg s)) \quad (1)$$

ce qui, en utilisant la distributivité de l'opération de conjonction, peut se développer en :

$$P(r) = P((r \wedge s) \vee (r \wedge \neg s)) = P(r \wedge s) + P(r \wedge \neg s). \quad (2)$$

Cela revient à dire que la probabilité d'obtenir l'événement r quelles que soient les circonstances est égale à la somme des probabilités d'obtenir r en même temps que s et r en même temps que *non* s . On peut rajouter :

$$P_s(r) = \frac{P(r \wedge s)}{P(s)} \quad (3)$$

avec $P_s(r)$ la probabilité conditionnelle d'occurrence de r si l'événement s se produit. On obtient donc :

$$P(r) = P_s(r)P(s) + P_{\neg s}(r)P(\neg s). \quad (4)$$

Cette conclusion est directement issue de la supposition de la validité du principe de bivalence ainsi que de l'opération de distributivité. Elle va nous servir de témoin. En effet, si cette égalité est invalidée, il faudra alors remettre en question l'une des ces hypothèses.

Nous allons maintenant exposer la violation de cette égalité témoin dans le cadre de l'expérience des fentes d'Young et de sa description par le formalisme quantique [1]. Pour réaliser cette expérience, un faisceau de particules (par exemple des photons ou des électrons) est émis en direction d'un écran qui enregistre la position des différents impacts des particules (le long d'un axe Ox). Sur le trajet du faisceau, on intercale une plaque opaque percée de deux fentes comme illustré sur la figure 1. Pour décrire la situation expérimentale, on doit construire les trois propositions suivantes :

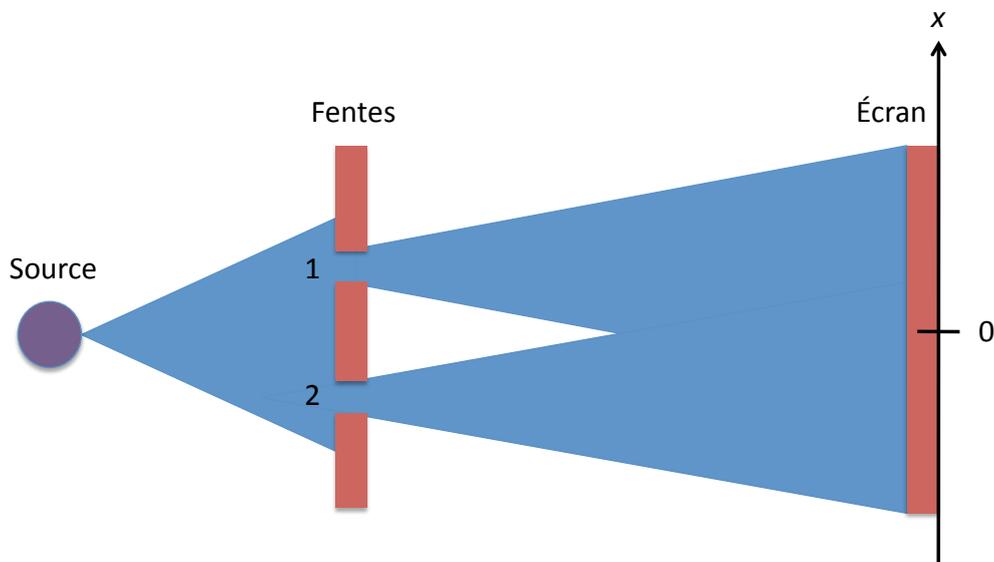


FIGURE 1 – Illustration de l'expérience des fentes d'Young.

- « x », la particule émise par la source est enregistrée par l'écran à la position x .
- « 1 », la particule émise par la source et ayant frappé l'écran en x est passée par la fente 1.
- « -1 », la particule émise par la source et ayant frappé l'écran en x n'est pas passée par la fente 1. Dans notre cas, « -1 » correspond exactement à « 2 », la particule émise et ayant frappé l'écran en x par la source est passée par la fente 2.

En reprenant le résultat témoin pour le principe de bivalence exprimé par l'équation 4, la probabilité $P(x)$ d'enregistrer une particule à la position x sur l'écran peut encore s'écrire :

$$P(x) = P_1(x)P(1) + P_{-1}(x)P(-1). \quad (5)$$

Il nous faut donc maintenant comparer ce résultat avec les prédictions théoriques de la mécanique quantique ainsi qu'avec les observations expérimentales.

La description quantique de l'expérience des fentes d'Young passe par la définition de deux préparations expérimentales élémentaires qui seront chacune représentée par un vecteur d'état particulier :

- seule la fente 1 est ouverte, la fente 2 est bouchée. On associera à cette situation le vecteur d'état $|\psi_1\rangle$.
- seule la fente 2 est ouverte, la fente 1 est bouchée. On associera à cette situation le vecteur d'état $|\psi_2\rangle$.

La mise en place conjointe des deux dispositifs élémentaires se décrit formellement grâce au principe de superposition linéaire et l'on obtient l'état décrivant le système total :

$$|\psi\rangle = \frac{1}{\sqrt{2}}(|\psi_1\rangle + |\psi_2\rangle) \quad (6)$$

Pour calculer la probabilité d'enregistrer une particule en x , il faut *projeter* l'état quantique du système sur l'espace des positions symbolisé par $|x\rangle$ et appliquer la règle de Born. On écrit alors :

$$P(x) = |\langle x|\psi\rangle|^2 = \frac{1}{2} |\langle x|\psi_1\rangle + \langle x|\psi_2\rangle|^2 \quad (7)$$

ce qui peut se développer comme :

$$P(x) = \frac{1}{2} \left(|\langle x|\psi_1\rangle|^2 + |\langle x|\psi_2\rangle|^2 + \langle \psi_1|x\rangle\langle x|\psi_2\rangle + \langle \psi_2|x\rangle\langle x|\psi_1\rangle \right) \quad (8)$$

En réutilisant la règle de Born, on peut affirmer que les deux premiers termes du second membre de cette équation correspondent aux probabilités d'obtenir respectivement « un impact en x et la particule est passé par la fente 1 » et « un impact en x et la particule est passé par la fente 2 ». De plus, les deux derniers termes de ce second membre correspondent à des « termes croisés » (fonctions non-nulles de x) reflétant une forme d'intrication entre les deux préparations élémentaires. On peut donc réécrire l'équation 8 comme :

$$P(x) = P_1(x)P(1) + P_{-1}(x)P(-1) + \text{termes croisés.} \quad (9)$$

L'équation témoin (4) est donc invalidée lors du traitement quantique de l'expérience des fentes d'Young à cause de la présence des termes croisés. Les prédictions de la mécanique quantique (équation 9) sont pourtant en très bon accord avec les résultats expérimentaux qui consistent en la formation d'une figure d'interférence lorsque le nombre d'impact devient important (non prédite par l'équation témoin 4).

L'équation témoin (4) a été établie en supposant le principe de bivalence et la distributivité de l'opération de conjonction. La violation de cette égalité impose le rejet de l'un, au moins, de ces deux éléments. Le rejet de l'ensemble des deux éléments conduit seulement à réaffirmer, par d'autres mots, l'inadéquation du calcul classique des probabilités à la situation expérimentale, déjà

mise en évidence ci-dessus. La remise en cause de la distributivité conduit à la définition d'une nouvelle logique que l'on nomme « logique quantique » initiée par Birkhoff et von Neumann en 1936. Cette voie présente un intérêt certain du point de vue de l'interprétation de la mécanique quantique, mais n'est pas la plus féconde quand à la discussion qui nous occupe ici. L'autre possibilité consiste à remettre en cause le principe de bivalence. Appliqué à notre situation, cela signifie que $(1 \vee \neg 1)$ n'est pas une tautologie. En clair, dire que la particule émise par la source est passée *soit* par la fente 1 *soit* par la fente 2 (ou $\neg 1$) n'est pas une formulation valide pour décrire la situation expérimentale.

Contrairement à ce que notre pensée classique pourrait nous suggérer, cette situation est parfaitement cohérente du point de vue expérimental car, à aucun moment, nous n'avons cherché à déterminer par quelle fente la particule pouvait passer. Le champ des probabilités associé à cette situation n'est donc pas contraint au niveau du choix d'une fente plutôt que de l'autre. L'attitude issue de la physique classique consistant à considérer que la particule doit passer par l'une OU l'autre des fentes provient d'un long conditionnement mental associé à la manipulation d'objets macroscopiques. Mais il faut bien comprendre ici que ce ne sont pas les objets quantiques qui ont des propriétés mystérieuses supplémentaires par rapport aux objets classiques, mais bien plutôt l'inverse. Nous considérons comme normal qu'un objet passe par l'une OU l'autre des fentes car nous sommes habitués à manipuler des systèmes auxquels on peut associer, en particulier, une trajectoire. Or, c'est par un processus physique très compliqué (la décohérence, nous y reviendrons plus loin) que les objets vont pouvoir être associé à une trajectoire propre. Le monde quantique présenté à travers le paradoxe des fentes d'Young est donc, en quelque sorte, plus basique que le monde macroscopique qui en émerge sous certaines conditions. Nous imaginons le monde macroscopique plus concret car nous l'avons scientifiquement compris bien avant le monde quantique.

Nous avons donc ici un exemple typique de l'émergence de la validité d'une distinction qui n'est pas pertinente initialement. Tant que l'on ne mesure pas expérimentalement par quelle fente passe la particule, dire que la particule passe par l'une OU l'autre des fentes n'a pas de sens. Si nous construisons un dispositif pour observer quelle fente est traversée (par exemple en mettant des caméras au voisinage des fentes), la description quantique va changer et les termes croisés des équations 8 et 9 vont disparaître (la figure d'interférence ne sera alors plus observée). Dans ce contexte expérimental, nous pourrions dire que la particule passe par l'une OU l'autre des fentes de façon totalement valide. La mécanique quantique traite explicitement l'influence du contexte expérimental sur le résultat de la mesure en intégrant l'information complémentaire fournie par l'ajout du nouveau dispositif de détection (cela est réalisée formellement à travers le postulat de réduction

du paquet d'onde [4]). Cela va même plus loin : le phénomène est défini en fonction du contexte expérimental. Ce cadre théorique contextuel permet d'envisager la définition de l'archétype du phénomène de débogage.

5 Formalisme de la matrice densité et contextualité

La donation d'un référent se reflète dans la possibilité de mise en œuvre d'un nouveau contexte expérimental qui va modifier la définition du phénomène observé et rendre distinguable les termes d'une alternative qui ne le serait pas sans ce référent. Nous allons voir dans le paragraphe suivant que le type de processus de débogage par « destruction des termes croisés ou de corrélation », décrit au paragraphe précédent, est un phénomène très fondamental qui peut se décrire de façon très générale à travers le formalisme de la matrice densité.

Le formalisme de la mécanique quantique correspond à une théorie de l'évaluation des probabilités qui a la particularité de tenir explicitement compte du contexte expérimental des phénomènes étudiés. D'après M. Bitbol, la mécanique quantique doit être considérée comme « *un calcul d'évaluations probabilistes conditionnelles, suspendu à l'interposition de telle ou telle structure expérimentale fixant sa propre gamme d'occurrences factuelles possibles, et non pas un calcul d'évaluations probabilistes catégoriques portant sur les éléments d'une gamme pré-donnée d'événements possibles* » [1]. Le vecteur d'état $|\psi\rangle$ est alors invariant et représente le système quel que soit le contexte expérimental. L'équation de Schrödinger sert alors à décrire l'évolution du système tandis que l'application d'un opérateur hermitien va nous permettre de décrire les opérations de mesures associées à un contexte expérimental précis. Concernant l'expérience des fentes d'Young étudiée ci-dessus, deux situations expérimentales nous intéressent particulièrement. On peut utiliser le dispositif comme décrit plus haut en observant seulement les impacts des particules sur l'écran. La description de cette situation dans le cadre de la physique quantique a été donné au paragraphe précédent.

D'autre part, on peut installer un dispositif de mesure (non-destructif) pour savoir par quelle fente passent les particules. Du point de vue de la mécanique quantique, intercaler un tel dispositif de mesure change l'état du système. Le formalisme va tout d'abord prédire une probabilité de $\frac{1}{2}$ pour le passage de la particule par l'une ou l'autre des fentes. Comme nous l'avons vu ci-dessus, la mesure fournit une information complémentaire sur le système, ce qui se traduit formellement par la réduction du paquet d'onde, c'est à dire la destruction de la superposition linéaire des états représentant les contextes expérimentaux élémentaires. On obtiendra donc suite à la mesure un nouvel état représentant le système qui sera soit l'état $|\psi_1\rangle$ représentant la particule passée par la fente 1 OU l'état $|\psi_2\rangle$ représentant la particule passée par la fente 2. Si l'on considère alors la probabilité d'obtenir un impact à la

position x sur l'écran dans ce contexte expérimental, le système n'est plus décrit par une superposition des états décrivant les passages par chacune des fentes, mais une particule qui a une chance sur deux de provenir de l'une ou l'autre des deux fentes. La probabilité d'obtenir un impact en x s'écrit alors comme la somme des probabilités d'avoir un impact en x en passant par la fente 1 et en passant par la fente 2 :

$$P(x) = P_1(x)P(1) + P_2(x)P(2) = P_1(x)P(1) + P_{-1}(x)P(-1) \quad (10)$$

ce qui est conforme à l'équation (4) témoignant de la validité du principe de bivalence. Dans ce contexte expérimental, il est donc valide de dire que la particule passe par l'une ou l'autre des deux fentes. Ceci est autorisé par la présence du dispositif de mesure associé. En modifiant le dispositif expérimental, on engendre un changement de l'ensemble du phénomène observé. Le cadre d'interprétation et de compréhension du phénomène est donc lui aussi modifié.

- Si l'on ne possède aucun référent concernant le passage de la particule par l'une ou l'autre des fentes (c'est à dire, si on ne réalise pas la mesure), on doit adopter une axiomatique du type [existence des fentes + ...] ne contenant pas le principe de bivalence.
- Si l'on utilise un système de détection (non-destructif) pour savoir quelle fente est traversée, il sera alors valide d'adopter une axiomatique plus contrainte du type : [existence des fentes + principe de bivalence + ...], plus conforme à notre habitude « classique » de penser.

Je crois que la transition ici mise en évidence, est un exemple de débogage dans le sens que nous utilisons pour la TGS. De façon générale, il s'agit de l'évolution du cadre, de la structure logique associée aux phénomènes et à la façon de les vivre ou de les percevoir. Même si cet exemple précis des fentes d'Young ne correspond pas à un débogage étudié directement par la TGS (encore que je crois qu'il est possible de trouver quelques connexions), l'étude de son expression dans le cadre formel de la mécanique quantique est une opportunité d'avancer dans notre recherche. Voyons donc comment se changement de contexte expérimental impacte le traitement quantique du problème.

Pour suivre l'effet de ce changement de contexte, nous allons supposer que nous avons construit un dispositif que l'on place après les fentes et dont on peut décider s'il réalise effectivement la mesure pour savoir par quelle fente passent les particules. Un exemple d'un tel dispositif est décrit dans l'ouvrage de M. Le Bellac [5]. Dans ce cadre, la description du problème doit alors intégrer la description du système de mesure additionnel. On écrira $|\chi_{10}\rangle$ l'état de ce dispositif lorsque l'on a mesuré la particule *passant par la fente 1* (état $|\psi_1\rangle$ pour la particule) et $|\chi_{01}\rangle$ son état lorsque la particule a été

mesuré *passant par la fente 2* (état $|\psi_2\rangle$). L'état représentant l'ensemble du système expérimental se construit comme le produit tensoriel de l'état de la particule et de l'état du dispositif additionnel qui lui correspond. L'équation (6) devient alors :

$$|\phi\rangle = \frac{1}{\sqrt{2}} (|\psi_1\rangle \otimes |\chi_{10}\rangle + |\psi_2\rangle \otimes |\chi_{01}\rangle) \quad (11)$$

De façon générale, en mécanique quantique plus avancée, on préfère souvent décrire le système par un opérateur plutôt que par un état. On utilise alors l'opérateur nommé « matrice densité » qui s'écrit dans notre cas [4] :

$$\rho = |\phi\rangle\langle\phi| \quad (12)$$

Cet opérateur présente de nombreux avantages, en particulier pour la description des systèmes dont la préparation n'est pas parfaitement connue. Il est d'autre part très intéressant pour traiter les problèmes de cohérence. C'est ce dernier aspect qui nous intéresse ici. Nous avons explicitement décrit le dispositif de mesure mais l'objet étudié est la seule particule. Pour le décrire, nous allons réduire la matrice densité initiale afin de ne conserver que les informations concernant la particule qui est une nouvelle matrice densité ρ_p . Pour cela, on calcul la trace de ρ sur le dispositif additionnel, ce qui peut s'écrire :

$$\rho_p = \langle\chi_{10}|\phi\rangle\langle\phi|\chi_{10}\rangle + \langle\chi_{01}|\phi\rangle\langle\phi|\chi_{01}\rangle \quad (13)$$

Cette matrice densité réduite peut s'écrire sous forme matricielle et dans la base $\{|\psi_1\rangle, |\psi_2\rangle\}$ on obtient :

$$\rho_p = \frac{1}{2} \begin{pmatrix} 1 & \langle\chi_{01}|\chi_{10}\rangle \\ \langle\chi_{10}|\chi_{01}\rangle & 1 \end{pmatrix} \quad (14)$$

Cette manière d'écrire la matrice densité est juste une manière de condenser l'écriture qui aurait donné sans cela :

$$\rho_{ph} = \begin{pmatrix} (\mathbf{1})|\psi_1\rangle\langle\psi_1| & + & (\langle\chi_{01}|\chi_{10}\rangle)|\psi_1\rangle\langle\psi_2| \\ (\langle\chi_{10}|\chi_{01}\rangle)|\psi_2\rangle\langle\psi_1| & + & (\mathbf{1})|\psi_2\rangle\langle\psi_2| \end{pmatrix} \quad (15)$$

Quoi qu'il en soit, la représentation matricielle permet de mettre en évidence ce que l'on appelle termes « diagonaux » et les termes « croisés ». On les repère comme suit :

$$\begin{pmatrix} \text{terme diagonal (fente 1)} & \text{terme croisé (fente 1 - fente 2)} \\ \text{terme croisé (fente 2 - fente 1)} & \text{terme diagonal (fente 2)} \end{pmatrix} \quad (16)$$

On appelle les termes diagonaux « populations » et les termes croisés « cohérences » [4]. Les populations correspondent aux probabilités moyennes de trouver le système dans l'état associé. Cela correspond, pour nous, à dire que l'on a une chance sur deux de trouver la particule *passant par la fente 1* et une chance sur deux de la trouver *passant par la fente 2*. Cela est le résultat attendu si l'on fait la mesure un grand nombre de fois. On aura alors en moyenne, la moitié des particules trouvées *passant par la fente 1* et l'autre moitié *passant par la fente 2*. A l'inverse, les cohérences traduisent les effets interférentiels associés à la superposition linéaire des états possibles.

Revenons en à l'impact du changement de contexte expérimental sur le formalisme de la mécanique quantique. Nous allons voir que la représentation du système sous la forme de la matrice densité réduite est un outil puissant pour traduire la transition que nous avons mise en évidence pour l'expérience des fentes d'Young. Dans le cadre formel que nous venons d'établir, nous pouvons exprimer simplement le fait que l'on mesure ou non le passage des particules par les fentes. D'après Le Bellac [5], si l'on mesure le passage par les fentes complètement, le dispositif de mesure est SOIT dans l'état $|\chi_{10}\rangle$ SOIT dans l'état $|\chi_{01}\rangle$. On a alors :

$$\langle \chi_{10} | \chi_{01} \rangle = \langle \chi_{01} | \chi_{10} \rangle = 0 \quad (17)$$

ce qui correspond à des termes croisés (ou de cohérence) nuls. A l'inverse, si l'on ne mesure pas le passage des particules à travers les fentes, on aura :

$$\langle \chi_{10} | \chi_{10} \rangle = \langle \chi_{01} | \chi_{01} \rangle = 1 \quad (18)$$

ce qui correspond à des termes de cohérences maximums. On peut donc traduire la transition associée à l'expérience des fentes d'Young comme illustré sur la figure 2. Lorsque l'on ne mesure pas le passage par les fentes, on doit se limiter à la notion d'existence des fentes, mais l'on ne peut donner de sens à un énoncé portant sur le passage de la particule par l'une des deux fentes. On ne peut en particulier pas utiliser le principe de bivalence sur ce type d'énoncé. Cela correspond à avoir des termes croisés ou de cohérence

Axiomatique :

Axiomatique :

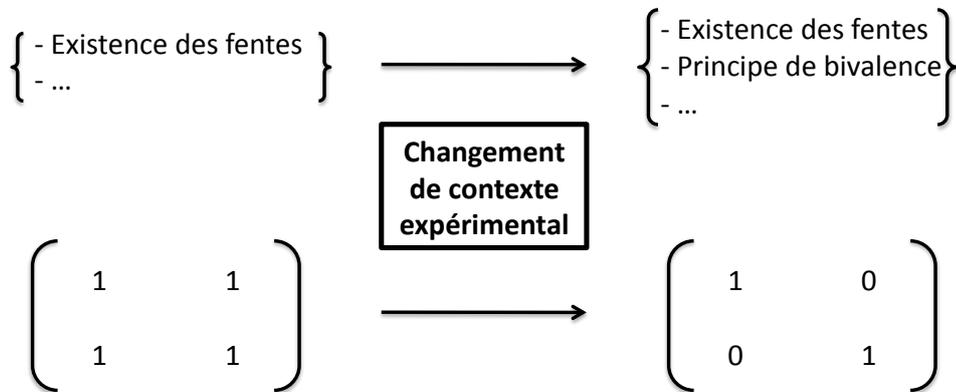


FIGURE 2 – Illustration de l’effet du changement de contexte expérimental sur l’axiomatique d’interprétation ainsi que sur le formalisme quantique avec les éléments de la matrice densité réduite.

non-nuls. Si l’on réalise effectivement une mesure du passage des particules par les fentes, on peut alors dire que la particule passe par l’une OU l’autre des fentes. On pourrait dire que ce type d’énoncé est alors débogué. Cela correspond à avoir des termes de cohérence nuls.

Il est envisageable que la transition de la modalité du raisonnement, mise en évidence ici en mécanique quantique, soit un comportement très général de la nature. On peut donc espérer formuler solidement les débogages de la TGS avec ce type d’approche.

6 Conclusion

Au cours de cette communication, nous avons initialement abordé quelques aspects de la « frontière » entre le monde dit « quantique » et le monde « classique ». Nous avons pu voir qu’en valeur moyenne, lorsque le nombre de constituants du système est grand (ou éventuellement lorsque la quantité d’action mise en jeu est importante devant h), les observables de la physique quantique se ramènent aux grandeurs habituelles en physique classique. Nous avons pu mettre en évidence la nécessité de certaines « références » pour que l’on puisse réaliser ces valeurs moyennes. Il a alors été possible de jeter un premier pont entre la TGS et la physique. Mais à ce stade, les choses demeurent imprécises et ne nous fournissent pas une base solide.

Afin d’approfondir cette problématique, nous avons alors précisé les différences entre les objets classiques et les objets quantiques. Dans le cadre de cette étude, nous retenons principalement qu’on associe sans problème toute

sorte de propriétés à un objet classique. On va même jusqu'à dire que cet objet « a » telle ou telle propriété. A contrario, nous avons vu que l'une des particularités frappantes des objets quantiques est de résister obstinément à ce type de conception. En toute généralité, le système quantique ne possède pas de propriété en lui-même. Le passage du monde quantique au monde classique correspond donc à l'émergence de comportements, d'outils logiques que l'on peut utiliser sans risque. Nous avons pu mettre en évidence que l'un de ces outils est le principe de bivalence qui fonde la possibilité de distinguer différentes alternatives possibles à une situation (par exemple, différents résultats ou valeurs à une mesure particulière). Il est alors possible de considérer les débogages de la TGS en lien avec l'émergence de la validité de ce principe de bivalence lorsqu'un référent est donné (disponible). Le pont que nous avons commencé à construire s'en trouve considérablement renforcer.

En nous appuyant sur les travaux de M. Bitbol et de B. d'Espagnat, nous avons ensuite étudié un exemple concret issue de la physique : l'expérience dite « des fentes d'Young ». Il a été (j'espère clairement) exposé les motivations qui peuvent conduire à voir la transition entre une modalité d'interprétation sans le principe de bivalence et une axiomatique qui l'admet. En effet, la mécanique quantique est une théorie contextuelle qui traite explicitement l'influence du dispositif expérimental sur le phénomène étudié. Cela va même plus loin, le phénomène est défini en fonction du cadre expérimental. Suivant les outils expérimentaux, les phénomènes doivent s'interpréter avec différentes axiomatiques.

L'exemple que nous avons exposé ne cadre pas directement avec les débogages de la TGS, mais nous avons pu montrer comment le formalisme quantique permettait de représenter cette transition du cadre d'interprétation/manifestation du phénomène à l'aide de la représentation matricielle de l'opérateur « densité ». Il est envisageable de supposer que ce type de formalisme (avec annulation ou non des termes de cohérences) soit pertinent pour décrire tout type de débogage. La figure 3, similaire à celle établie pour notre exemple particulier (figure 2), résume cette perspective dans les termes que nous employons dans notre étude sur la TGS. On pourrait ainsi remplacer $|valeur1\rangle, |valeur2\rangle$ par $|avant\rangle, |après\rangle$ ou encore par $|ici\rangle, |ailleurs\rangle$, etc ...

Arriver à ce stade, nous pouvons entrevoir deux perspectives principales. Dans un premier mouvement, cette étude permet de montrer une certaine communauté de structure logique entre la physique quantique et la TGS. La physique quantique à l'avantage d'être solidement formulée. Il nous est donc possible potentiellement d'utiliser ses outils formels pour développer la TGS. En outre, le simple constat de cette similitude d'approche entre les deux théories est un élément militant fortement pour la pertinence de la TGS. De plus, cette dernière interrogeant la question du Sens de façon très profonde, on peut espérer que la TGS généralise l'approche contextuelle développée au sein de la mécanique quantique.

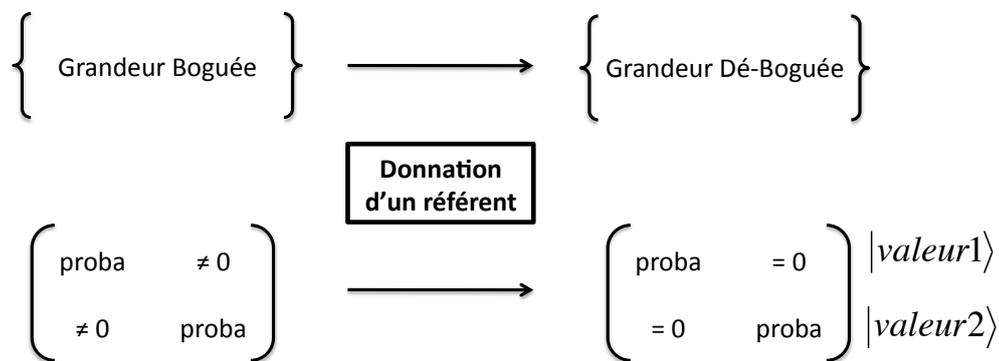


FIGURE 3 – Formalisme typique pour exprimer un débogage basé sur la formalisation du phénomène de décohérence en physique quantique. Nous avons limiter la base à la dimension 2 (deux valeurs différentes), mais ce schéma est généralisable à un nombre arbitraire de dimension.

Parallèlement à ce travail sur la TGS dans sa globalité, les travaux présentés ici ouvrent aussi une voie quant à la validation de la partie « physique » de la TGS. On peut en effet espérer exprimer directement dans ce formalisme les débogages concernant le temps, l'espace et les dimensions d'emboîtements. Il existe très probablement des pistes déjà explorées par les physiciens (en particulier la discussion sur le paradoxe EPR dont j'avais déjà parlé il y a quelques temps) que nous pouvons exploiter. En renversant l'approche, on pourra alors s'appuyer sur les zones validées de la TGS (par ce qui existe déjà en physique) pour faire de nouvelles découvertes qui, rêvons un peu, enrichiront cette même physique. Ce point de mire lointain serait néanmoins un forte validation de la théorie en l'intégrant, du coup, dans la démarche scientifique globale.

Références

- [1] M. Bitbol, « MÉCANIQUE QUANTIQUE (une introduction philosophique) », Champs FLAMMARION (1999).
- [2] J-L Léonhardt, « LE RATIONALISME EST-IL RATIONNEL? (L'Homme de science et sa raison) », Sens Public PARANGON/Vs (2008).
- [3] B. d'Espagnat « LE RÉEL VOILÉ (Analyse des concepts quantiques) », Le temps des sciences FAYARD (1994).
- [4] C. Cohen-Tannoudji, B. Diu et F. Laloë, « MÉCANIQUE QUANTIQUE I », Collection enseignement des sciences HERMANN (1973).
- [5] M. Le Bellac, « PHYSIQUE QUANTIQUE », Savoirs Actuels CNRS ÉDITION/EDP SCIENCES première édition (2003).