

Introduction à la Mécanique Quantique
et
résumé de l'interprétation proposée par M. Bitbol

S. Correia*

8 janvier 2003

Table des matières

1	Brefs rappels de physique classique	3
1.1	Avant la Mécanique Quantique : le monde classique	3
1.1.1	La vision corpusculaire	3
1.1.2	La vision ondulatoire	4
1.1.3	Limites de la physique classique	5
2	Naissance de la Mécanique Quantique	6
2.1	Les débuts de la mécanique quantique	6
2.2	Quelques expériences décisives	8
2.2.1	L'expérience de diffraction d'Young	8
2.2.2	L'expérience des fentes d'Young	8
3	Résumé de l'interprétation de M. Bitbol	10
3.1	Introduction	10
3.2	Résumé et extraits de [3]	11
4	Conclusion	51
A	Rappels de logique classique	52
B	Rappel sur les nombres complexes	52
C	Les différentes conceptions de la probabilité	53
D	Les différentes statistiques sur un exemple	53
E	Les principaux acteurs de la révolution quantique	54
F	Quelques url intéressantes	54

*s.correia@free.fr

Table des figures

1	Expérience de diffraction de Young.	9
2	Phénomène d'interférences.	9
3	Expérience des fentes de Young.	9
4	Les quatre contextes expérimentaux correspondant à l'expérience des fentes d'Young.	19
5	Indiscernabilité des particules lors d'une collision. En Mécanique Quantique, n'ayant plus la notion de trajectoire clairement définie, il n'est pas possible de savoir quelle particule est partie vers la droite. En mécanique classique, on sait ce qui se passe dans le cercle alors que c'est impossible en Mécanique Quantique en raison du principe d'incertitude de Heisenberg.	22
6	Mesure de la polarisation de la lumière. Les photons émis d'une source S sont polarisés en traversant le premier polariseur (P1) et la probabilité de passage à travers le second polariseur (P2) (orienté d'un angle α par rapport au premier) est mesurée en observant le nombre de fois où le photon atteint l'écran E rapporté au nombre de photons émis.	26
7	L'instrument mathématique de la Mécanique Quantique.	28
8	Les différentes possibilités du schéma préparation - (évolution) - mesure. . .	32
9	Représentation de deux variables incompatibles A et B	36
10	Découpage d'une expérience comportant des mesures séquentielles	37
11	Les trois premiers modes de vibration de la corde vibrante.	49
12	Représentation d'un nombre complexe.	53

Résumé

J'ai trouvé passionnante l'introduction philosophique à la Mécanique Quantique qu'a écrite M. Bitbol [3]. Sa façon de présenter la Mécanique Quantique est très différente de celle enseignée à l'université et encourage vivement à réfléchir plus avant sur les fondements de cette partie de la physique.

J'ai voulu faire ici un résumé de ce livre. J'y ai mis les choses qui me paraissent importantes à retenir. Certains aspects sont nouveaux pour moi et sont peut-être plus détaillés. D'autres, au contraire, le sont moins et peuvent manquer de précisions pour ceux qui ne connaissent pas déjà un peu la Mécanique Quantique.

Pour ceux qui sont effrayés par les équations, j'ai essayé d'être aussi limpide que possible. La plupart d'entre elles demande simplement la connaissance des nombres complexes (un rappel suffisant est fait dans l'annexe B) et du théorème de Pythagore. En prenant un peu le temps de se familiariser avec les notations (qui sont celles en usage encore actuellement chez les physiciens), je pense qu'on peut mieux voir la simplicité mathématique de la Mécanique Quantique et en même temps mieux comprendre les difficultés d'interprétation qu'elle engendre.

Il y a dans ce résumé beaucoup de notes de bas de page. Je m'en excuse auprès de ceux qui n'aiment pas ce type de notes. Certaines sont là pour donner des éclaircissements sur certains points, d'autres sont plus des remarques, voire des interrogations plus personnelles.

Avant de commencer le résumé proprement dit, j'ai écrit deux parties préliminaires, l'une pour présenter l'état de la physique classique à la fin du 19^e siècle, l'autre pour présenter les débuts de la Mécanique Quantique. La partie 3 est l'essentiel de ce travail et résume relativement en détail le livre de M. Bitbol.

1 Brefs rappels de physique classique

Dans cette partie, je rappelle très brièvement l'état de la physique classique à l'époque où la Mécanique Quantique a commencé à apparaître.

1.1 Avant la Mécanique Quantique : le monde classique

À la fin du 19^e siècle, la physique était constituée de deux théories distinctes décrivant des phénomènes très différents. La première s'applique aux corps matériels (Newton), la seconde s'applique aux rayonnements (Maxwell).

1.1.1 La vision corpusculaire

C'est la mécanique classique en grande partie due à Isaac Newton. Le mouvement de tout corps (même possédant un volume) peut être décrit par le mouvement de son centre de gravité. Mathématiquement, cela simplifie les choses puisque l'on a seulement à décrire le mouvement d'un point dans l'espace. C'est ce qu'on appelle la mécanique du point.

La mécanique classique décrit le mouvement des corps par leur position (repérée par \mathbf{x} , vecteur tridimensionnel) en fonction du temps t . Elle décrit l'histoire d'un point, son évolution dans le temps. Le point est l'objet essentiel de la mécanique classique.

L'équation fondamentale de Newton relie l'accélération de l'objet (donnée par la dérivée seconde de \mathbf{x} par rapport au temps, c.-à-d. le taux de variation de la vitesse par intervalle de temps) aux forces \mathbf{F} s'exerçant sur lui. L'équation mathématique, enseignée maintenant au lycée, est la suivante :

$$m\mathbf{a} = \mathbf{F}, \tag{1}$$

où m est la masse du corps dont on étudie le mouvement et $\mathbf{a} = \frac{d^2\mathbf{x}}{dt^2}$ est son accélération. Cette équation différentielle permet de déterminer la position \mathbf{x} du corps à n'importe quel instant t si l'on connaît la position \mathbf{x} et la vitesse ($\mathbf{v} = \frac{d\mathbf{x}}{dt}$) du corps à un instant donné (en général, on choisit $t = 0$) et l'ensemble des forces agissant sur lui.^{1 2} Ces deux valeurs, \mathbf{x} et \mathbf{v} pour $t = 0$, forment les conditions initiales nécessaires pour résoudre l'équation différentielle (1).³

Comme chacun sait, la théorie de Newton est à la base de l'astronomie. Elle explique de façon relativement correcte le mouvement des astres dans l'espace (si l'on oublie les effets relativistes pris en compte par la théorie de la relativité d'Einstein). Newton a également essayé d'appliquer cette théorie aux photons,⁴ en considérant les photons comme des particules de lumière qui suivent les lois de la mécanique classique [6]. C'est-à-dire qu'ils se propagent en ligne droite et peuvent subir des chocs lorsqu'ils rencontrent la matière. Cependant, certains phénomènes ne peuvent pas s'expliquer avec cette théorie. En effet, selon cette vision corpusculaire, la lumière est constituée d'un flot de particules qui, lorsqu'il rencontre un obstacle, laisse dans l'ombre l'arrière de l'obstacle. Or il s'avère que l'ombre projetée n'est pas aussi nette que les bords de l'obstacle. Au contraire, il apparaît des franges alternativement brillantes et sombres sur les bords de l'ombre projetée. Ce phénomène sera expliqué par la théorie des ondes.

1.1.2 La vision ondulatoire

En ce qui concerne la lumière, la question de savoir si elle est onde ou⁵ particule est une très ancienne question. Dès le début du 19^{ème} siècle (1803), Thomas Young observa que la lumière avait un comportement ondulatoire lors d'expériences de diffraction et d'interférences. Ceci conforta la théorie de Christian Huygens qui s'opposait à la théorie corpusculaire d'Isaac Newton.

La théorie de Newton pouvait expliquer les ombres projetées par des objets placés devant une source lumineuse: les particules de lumière ne passent pas à travers l'objet, mais suivent une trajectoire rectiligne conforme à la théorie de Newton. Cependant, les phénomènes d'interférence, qui montrent différents pics d'intensité lumineuse lorsque la lumière traverse des fentes, ne trouvaient pas d'explication sans le recours à la théorie des ondes. De plus, il s'avère que même l'ombre projetée par un objet placé devant une source lumineuse n'est pas aussi nette que le laisse entendre la théorie corpusculaire. Il y a en effet un phénomène de diffraction, qui lui aussi s'explique par la théorie ondulatoire.

1. La découverte d'un temps absolu (c.-à-d. détaché de son environnement et identique pour tout observateur) remonte à l'époque où Galilée étudiait les oscillations du pendule. La conception mathématique d'un temps absolu universel est due à Newton. Cette conception sera mise en défaut par la théorie de la relativité d'Einstein.

2. Note personnelle : Il sort de cette remarque que le temps, ou du moins la mesure de celui-ci, peut être contextuelle. Attention la relativité ne dit pas ça : la mesure du temps est indépendante du fait que le temps est mesuré ou non.

3. Note personnelle : Notons que cette connaissance de la position \mathbf{x} et de la vitesse \mathbf{v} est essentielle pour prédire l'évolution du point. Cependant les conditions initiales peuvent choisie à des instants différents, pas nécessairement toutes deux au même instant.

4. le terme de photon est apparu en 1926.

5. Note personnelle : Remarquons que la conjonction de coordination *ou* montre clairement que la physique classique ne pense pas un instant à la possibilité pour la lumière d'avoir à la fois les deux caractéristiques. Et pour cause : La physique classique voit la particule comme une concentration d'énergie et d'autres propriétés localisées dans l'espace et le temps, tandis que l'onde est vue étalée sur une large région d'espace et de temps. On voit nettement l'opposition des deux conceptions.

À la fin du 19^{ème} siècle, la nature ondulatoire de la lumière ne semblait plus faire aucun doute.

1.1.3 Limites de la physique classique

Au 19^{ème} siècle, la physique semblait avoir atteint de bonnes bases et tous les phénomènes semblaient pouvoir s'expliquer simplement à partir des mouvements des constituants élémentaires de la matière [8]. La description des mouvements des corps solides avait une formulation très générale apportée par Hamilton. La thermodynamique a trouvé ses bases avec Gibbs dans la description microscopique de particules en mouvement. Les ondes aussi pouvaient s'expliquer par des mouvements collectifs de la matière et les équations de Maxwell (1864) en donnaient une bonne description. À la fin du 19^{ème}, Maxwell a fourni un ensemble d'équations ayant pour but de décrire les phénomènes électromagnétiques. Il s'est avéré que ces équations pouvaient aussi être utilisées pour décrire les rayonnements optiques et les ondes radio découvertes récemment par Hertz.

Tous les phénomènes macroscopiques semblaient donc parfaitement décrits comme des mouvements de matière ou de ses constituants. Beaucoup de scientifiques pensaient que l'état de la physique de l'époque était suffisant pour expliquer tous les phénomènes.

Les premiers phénomènes non attendus par la physique classique sont apparus dès la fin du 19^{ème} siècle, avec la découverte des rayons X par Conrad Röntgen en 1895. Ceux-ci se comportent de la même façon que la lumière à ceci près qu'ils sont capables de pénétrer la matière. Étant donnée que la distance interatomique d'un cristal est très proche de la longueur d'onde des rayons X, Max von Laue (1912) développa la théorie de la diffraction (phénomène ondulatoire) en 3 dimensions pour expliquer la diffraction des rayons X par les cristaux. Il donna ainsi naissance à la radiocristallographie. Cette théorie permit des prédictions très précises et la nature ondulatoire des rayons X ne faisait déjà aucun doute dès 1901.

En 1896, c'est la radioactivité qui est découverte par Antoine Henri Becquerel et étudiée par Pierre et Marie Curie. Les travaux sur la radioactivité et les travaux d'Ernest Rutherford (prix Nobel de Chimie 1908) à Manchester sur les raies spectrales⁶ de différents éléments chimiques ont montré que l'atome n'était pas sans structure, comme on le pensait jusqu'alors, mais qu'il était composé d'un noyau compact, et que certains noyaux atomiques pouvaient émettre un rayonnement.

En 1897, Thomson a montré que les rayons émis par la cathode de tubes à décharges étaient constitués de particules chargées négativement et dont la masse était très inférieure à celle de l'atome. C'est la découverte de l'électron.

Lorentz a utilisé la théorie de Maxwell pour expliquer l'émission de lumière par les porteurs de charge électrique. Comme on l'a vu, la théorie de Maxwell relie la lumière aux ondes électromagnétiques. Seulement, la physique classique suppose une continuité dans le mouvement et dans la perte ou le gain d'énergie. Et cette continuité s'opposait aux expériences qui montraient que les atomes ne pouvaient émettre des rayonnements seulement à certaines longueurs d'onde (c.-à-d. à certaines énergies fixées).

6. Les raies spectrales sont des lignes obscures (raies d'absorption) interrompant un spectre continu, ou des lignes brillantes (raies d'émission) formant avec d'autres un spectre d'émission. Le spectre est l'ensemble des rayonnements monochromatiques obtenus par décomposition d'une lumière complexe. L'arc-en-ciel donne le spectre la lumière blanche.

À l'aide de l'électrodynamique classique, Wilhelm Wien dérivait une expression de la distribution de fréquences des radiations en étudiant le rayonnement de "corps noir"⁷ des corps solides chauds. Cependant, sa formule ne parvenait pas à décrire les expériences à la fois à hautes fréquences et à basses fréquences.

2 Naissance de la Mécanique Quantique

2.1 Les débuts de la mécanique quantique

Ce fut Max K. E. L. Planck qui, le premier, émit l'idée selon laquelle l'énergie rayonnée ne pouvait être émise qu'en quanta, c.-à-d. proportionnelle à la fréquence par un facteur constant (la constante de Planck h)⁸. La formulation de Planck est considérée comme le début de la Mécanique Quantique. Planck a découvert que l'énergie d'un système varie de façon discontinue, c.-à-d. par sauts [7]. L'énergie émise par un tel système ne peut être qu'un multiple du quantum d'action de Planck, qui représente ainsi le plus petit saut en énergie que peut faire ce système⁹. Lors de son prix Nobel en 1918, Planck disait : "Le produit $h\nu$ est en fait la plus petite quantité de chaleur que peut rayonner une vibration de fréquence ν . Planck n'acceptait cependant pas l'idée que la lumière fut composée de particules.

Cette théorie a été confirmée par le fait que la lumière est aussi émise sous forme de quanta d'énergie, comme le montre la théorie d'Einstein de l'effet photoélectrique¹⁰ (découvert par Hertz en 1887).

Einstein proposa la loi qu'un électron émis d'un matériau par une lumière monochromatique de fréquence ν avait une énergie maximale de $E = h\nu - P$, où P est l'énergie nécessaire pour arracher l'électron au matériau dans lequel il se trouve. Après 10 années d'expériences, Millikan confirma la validité de cette loi avec une grande précision en 1916.

Plus tard, les expériences de James Franck et Gustav L. Hertz ont montré l'inverse de l'effet photoélectrique, à savoir qu'un électron frappant un atome doit avoir une énergie minimale pour que l'atome puisse émettre un rayonnement. Ces expériences ont confirmé la théorie de Planck.

À cause de la stabilité de la matière, la mécanique de Newton ne peut pas expliquer les phénomènes au niveau de l'atome. En effet, un électron, décrit comme une charge électrique classique tournant autour d'un noyau, devrait émettre de l'énergie sous la forme d'un rayonnement électromagnétique. Ce faisant, il perdrait son énergie (donc sa vitesse) et tomberait sur le noyau du fait de son attraction électromagnétique. Bohr en conclut déjà [7, p. 64] que le langage courant ne permettra pas de décrire correctement ce qui se passe dans un atome, puisqu'une description visuelle de la structure de l'atome pourrait nécessairement être expliquée par les lois de la physique classique. Si tel est le cas, comment la science peut-elle avancer? Bohr espère que l'accumulation de nouvelles expériences fera apparaître de nouveaux concepts au cours du temps.

7. Un corps noir est un corps qui absorbe toute l'énergie qu'il reçoit. Aucune lumière n'en ressort, il apparaîtrait donc noir. C'est un parfait émetteur, et l'énergie émise est une fonction de la température et de la fréquence émise seules : $E = J(T, \nu)$ formule de Kirchoff 1859.

8. Il semble que la paternité de cette découverte soit encore controversée [9].

9. C'est ce qu'on appelle la première quantification.

10. La théorie ondulatoire de la lumière ne permet pas d'expliquer pourquoi certains matériaux émettaient un courant électrique lorsqu'ils étaient éclairés par de la lumière.

L'expérience a conduit à l'hypothèse des quanta. Cette hypothèse permet à Bohr, en 1920, d'expliquer la curieuse stabilité des atomes, par des relations numériques dues à la quantification des niveaux d'énergie dans l'atome, mais l'origine de ces relations n'est pas clairement comprise. Les relations mathématiques pour décrire la physique quantique sont souvent déduites par analogie avec les formules de la théorie classique en remplaçant les variables classiques par des opérateurs.

La théorie atomique de Bohr est fondée sur les expériences de Rutherford en Angleterre. L'atome est vu comme un mini-système planétaire, où le noyau serait le soleil et les électrons les planètes [7, p. 56]. Mais les orbites des électrons ne sont pas déterminées uniquement par les lois de Newton. Les orbites ne sont pas modifiées par des perturbations extérieures. La stabilité des atomes ne s'explique qu'avec des conditions supplémentaires ne provenant pas de la mécanique classique. Depuis Planck (1900), ces conditions sont appelées "conditions quantiques".

Niels H. D. Bohr a montré, à partir de l'image de mini-système planétaire de l'atome, que les raies spectrales émises par les atomes ne peuvent s'expliquer que si les orbites des électrons sont stationnaires et caractérisées par un moment angulaire multiple de $\hbar = h/2\pi$ et que l'énergie $h\nu$ des rayonnements émis correspond à la différence d'énergie entre deux états stationnaires de l'électron (entre deux orbites quantiques). En utilisant la loi d'Einstein sur l'effet photoélectrique, Bohr montra que la lumière émise par un atome lorsque celui-ci subit une transition d'un état d'énergie E_1 vers un état d'énergie E_2 a une fréquence $\nu = \frac{E_1 - E_2}{h}$.

Arthur H. Compton a montré que les rayons X (qui peuvent être vus comme de la lumière à très haute fréquence) changent de fréquence lors de leur diffusion par les électrons. Cette expérience peut s'expliquer si les rayons X sont de petits corpuscules (ce sont les photons suggérés par Einstein en 1905 lors de son étude de l'effet photoélectrique) qui entrent en collision avec les électrons [7, p. 87]. Cependant, de nombreuses expériences ont montré que la lumière se comporte de la même façon que les ondes radioélectriques. Sa différence réside dans une longueur d'onde plus courte (fréquence plus élevée). De ce fait, la lumière est plutôt perçue comme une onde et non comme un courant de particules. Compton, qui étudiait la perte d'énergie des rayons X lors de la diffusion sur des particules matérielles, a montré que ces rayons obéissent aux mêmes règles quantiques que la lumière. Il précise en effet que tous les phénomènes attribués à la lumière (réflexion, réfraction, diffusion, polarisation, diffraction, spectre d'émission et d'absorption, effet photoélectrique) apparaissent aussi pour les rayons X. Dans le même temps, certains de ces phénomènes changent graduellement lorsque l'énergie des rayons augmente. En effet, lors de leur diffusion, les rayons X voient leur longueur d'onde augmenter. Le problème est que la théorie ondulatoire classique ne permet pas d'expliquer ce déplacement de longueur d'onde. Compton explique donc ce phénomène par la diffusion de deux particules : le photon et l'électron. Certains électrons étant quasiment libres dans la matière, ils peuvent recevoir de l'énergie en absorbant une partie de l'énergie du photon incident.

En 1923, Prince Louis-Victor P. R. de Broglie réduisit la séparation, jusque là très forte, entre la matière et le rayonnement en supposant que les particules de matière comme les électrons pouvaient aussi se comporter comme des ondes, puisque les ondes électromagnétiques avaient bien des propriétés de particule sous la forme de photons. Les premières expériences de Clinton J. Davisson montrent en effet que l'électron peut se réfléchir comme le ferait une onde sur un cristal, permettant ainsi de mesurer la longueur d'onde de l'élec-

tron et de vérifier la théorie de de Broglie. Erwin Schrödinger alla plus loin que de Broglie, et écrivit un article fondamental en 1926 ("Quantization as an eigenvalue problem"). Il créa la "mécanique ondulatoire". L'année précédente, Werner K. Heisenberg proposait une autre approche mathématique appelée "mécanique matricielle". Schrödinger montra plus tard que les deux approches étaient équivalentes. Cette nouvelle mécanique, la Mécanique Quantique, montrait l'inadéquation de l'image d'orbites atomiques que proposait la mécanique classique et elle impliquait aussi des limitations naturelles à la précision des mesures simultanées de certaines quantités effectuées sur les objets microscopiques (relations d'incertitude de Heisenberg).

En 1928, Dirac introduisit la relativité restreinte d'Einstein dans la mécanique quantique. Sa théorie expliquait de façon naturelle l'existence de spin pour les particules et prédisait l'existence d'antiparticules, c.-à-d. de particules de même masse, mais de charge opposée. Le positron, l'antiparticule de l'électron, fut découvert en 1932 par Carl D. Anderson qui étudiait le rayonnement cosmique. La trace laissée par cette particule dans la chambre à bulles de Wilson avait toutes les caractéristiques de l'électron, exceptée la charge qui était positive.

Max Born, qui dirigeait Heisenberg au début des années 1920, reçut plus tardivement le prix Nobel (1954) pour son interprétation probabiliste de la fonction d'onde.

Wolfgang Pauli formula le principe d'exclusion sur la base de la théorie de Bohr. Ce principe dit que deux particules identiques ne peuvent pas se trouver dans le même état quantique. Il est relié à la symétrie particulière de la fonction d'onde des particules de spins multiples de $\hbar/2$, que l'on appelle fermions.

2.2 Quelques expériences décisives

2.2.1 L'expérience de diffraction d'Young

24 Nov. 1803, devant la Royal Society de Londres, alors que la plupart des scientifiques acceptaient la théorie corpusculaire de la lumière proposée par Newton, Thomas Young expliqua la première expérience mettant en évidence la *diffraction* de la lumière, et par conséquent prouvant la nature ondulatoire de la lumière¹¹.

Un rayon de lumière passe par une fente (voir la Fig. 1), puis est divisé par une carte dont l'épaisseur est inférieure au diamètre du rayon lumineux. Le résultat est vu sur un écran et montre des franges plus ou moins brillantes (figure de droite de la figure 1).

2.2.2 L'expérience des fentes d'Young

Un exemple de franges *d'interférences* est donné par la Fig. 2. Le concept de corpuscule de lumière ne peut pas expliquer ce phénomène. Par contre, si la lumière est une onde, les deux fentes agissent comme de nouvelles sources de lumières. Les ondes sortant de chacune des deux fentes, en se rencontrant, s'ajoutent (interférences constructives) ou s'annulent (interférences destructives). Les franges brillantes indiquent les endroits où les interférences ont été constructives, et les franges sombres ceux où elles ont été destructives.

11. Images extraites de <http://www.cavendishscience.org/phys/tyoung/tyoung.htm>

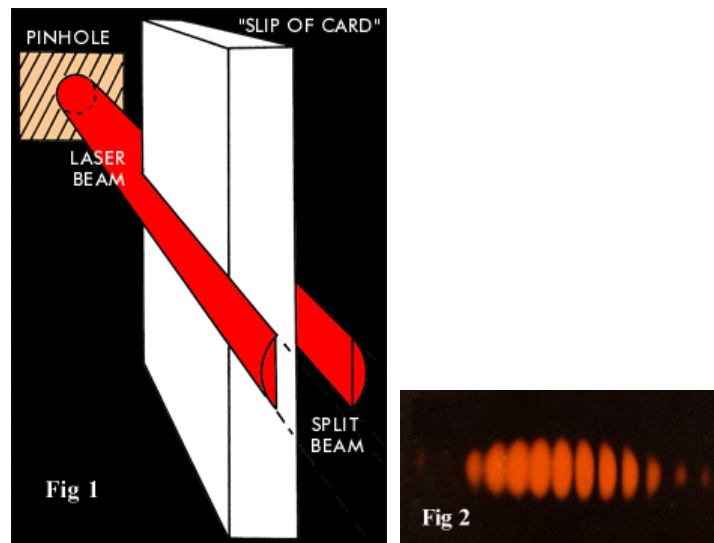


FIG. 1 – *Expérience de diffraction de Young.*

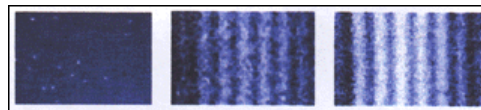


FIG. 2 – *Phénomène d'interférences.*

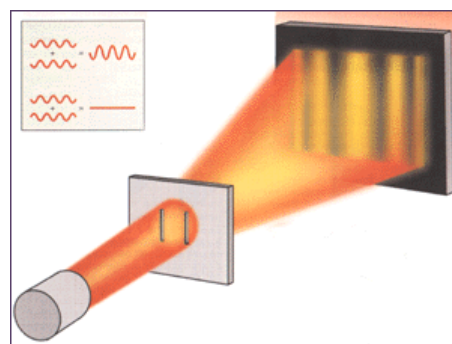


FIG. 3 – *Expérience des fentes de Young.*

3 Résumé de l'interprétation de M. Bitbol

Dans cette partie, je me propose de faire un résumé assez détaillé de l'interprétation de M. Bitbol telle qu'elle est présentée dans [3]. Les citations sont notées en retrait par rapport au reste texte.

3.1 Introduction

La Mécanique Quantique est arrivée avec l'étude des constituants élémentaires de la matière que sont les atomes. Dans la conception corpusculaire, ceux-ci sont des entités porteuses de propriétés comme la masse, la vitesse... Or ces propriétés ne sont accessibles que par des expériences qui au minimum les perturbent, au maximum les engendrent. Il faut également admettre qu'en général, il est impossible d'attribuer les propriétés détectées à l'une ou l'autre des particules (indiscernabilité des particules).

Les difficultés d'interprétation posées par les expériences proviennent des présupposés de la mécanique classique et du langage employé attaché à la conception classique. Heisenberg (voir la référence Heisenberg (1948) p104 dans [3]) met déjà en doute l'existence des particules bien qu'il leur attribue tout de même des propriétés. La théorie de la Mécanique Quantique se retourne contre ce corps de présupposés. Il faut essayer de repenser l'interprétation de la Mécanique Quantique en se débarrassant des présupposés du langage courant. La grande question est qu'est-ce que l'objet de la Mécanique Quantique ? À quelle ontologie est-on arrivé ?

La Mécanique Quantique doit se débarrasser des concepts classiques, mais elle doit rester compatible avec une description macroscopique du monde. La continuité descendante allant du macroscopique au microscopique pose des problèmes. Et on ne peut certainement pas se contenter d'une théorie quantique complètement découplée du monde macroscopique. Les phénomènes macroscopiques doivent pouvoir se déduire de la Mécanique Quantique si celle-ci se veut une théorie fondamentale. Une façon de relier les deux mondes (microscopique et macroscopique) par la théorie serait possible en utilisant la continuité ascendante (microscopique \rightarrow macroscopique). Les théories actuelles y travaillent (décohérence...) mais ont leurs limites.

Le problème que pose la Mécanique Quantique vient peut-être du fait que d'un côté elle doit dire quelque chose du monde, de l'autre elle ne doit pas être interprétée mais constitue seulement un ensemble de règles opératoires. Plusieurs chercheurs (Heisenberg, Pauli, Born, Bohr...) ont tenté de n'attribuer aucune interprétation à la théorie de la Mécanique Quantique, mais cela pose des problèmes qu'on mentionnera au paragraphe 1-2-11. Ils ont par ailleurs toujours tenté d'établir une connexion entre le monde macroscopique (classique, courant) et le monde microscopique. Une des raisons pour lesquelles cette connexion est nécessaire, est que les expériences sont macroscopiques : les instruments de mesure sont macroscopiques. Une autre raison est la nécessité de communiquer des résultats. Les physiciens continuent de parler de particules bien qu'ils comprennent que ces particules ne peuvent être interprétées dans le sens classique.

Bitbol se propose dans un premier temps de remettre en cause le concept de propriété. Il existe deux formes de propriétés :

- les propriétés immédiatement accessibles,
- et les propriétés accessibles indirectement par un appareillage qui les modifie.

Un autre concept examiné est celui de “support” individualisé et réidentifiable des propriétés.

La Mécanique Quantique ne fournissant que des probabilités d’apparition d’événements, on rappellera dans un premier temps les notions de base des probabilités. On verra que les probabilités apparaissant en Mécanique Quantique ne vérifient pas toujours les théorèmes connus des probabilités classiques. La Mécanique Quantique apparaît comme une théorie généralisée des probabilités. Les probabilités classiques n’opèrent que sur une seule gamme d’événements possibles correspondant à un contexte donné. Au contraire, la Mécanique Quantique gère plusieurs gammes de possibles, chaque gamme correspondant à un contexte différent pouvant même être exclusif. La Mécanique Quantique est un formalisme méta-contextuel et utilise par conséquent une logique méta-contextuelle.

On verra au paragraphe 1- que le langage courant n’est pas habitué à la logique méta-contextuelle. Si l’on n’y prête pas garde, le langage, utilisant une logique classique pour décrire les choses, peut conduire à des interprétations paradoxales des événements quantiques.

Le paragraphe 2- présente la Mécanique Quantique comme un schéma prédictif contextuel. Bitbol montre l’interprétation des trois étapes fondamentales d’une expérience, à savoir la préparation (signification du vecteur d’état), l’évolution (équation de Schrödinger) et la mesure (réduction du vecteur d’état).

Au paragraphe 3-, Bitbol revient sur les images utilisées pour comprendre les phénomènes et sur l’utilisation du concept d’objet.

Le quatrième paragraphe présente rapidement les théories qui ont pu être construites dans le contexte des présupposés du langage courant et des images que l’on peut employer pour la description des phénomènes.

La dernière partie montre le début d’un changement d’ontologie de la Mécanique Quantique. L’objet classique a perdu beaucoup de son sens, ce qui nécessite une remise en cause de l’objet sur lequel la Mécanique Quantique porte son attention.

3.2 Résumé et extraits de [3]

Dans ce paragraphe, je reprends presque chaque section de [3] pour en extraire l’essentiel. Les titres des sections du livre sont conservés et notés avec des tirets (ex. section 1-2-5 ou section 1-), ce qui permettra de retrouver rapidement telle ou telle partie directement dans [3].

1- Le Possible, le Probable, et les contextes. Dans cette première partie, Bitbol définit l’*explication scientifique* : un phénomène est expliqué s’il est déduit de causes. La validité de l’explication est testée en utilisant des causes connues pour prédire un phénomène inconnu. Mais cela ne suffit pas. Une explication doit aussi rendre compte des lois qu’elle utilise. Or on explique un phénomène à l’aide de lois. Pour démontrer les lois, il faut partir de principes plus généraux. Une explication part du général pour aller au particulier.

1-1-5 Indéterminisme et prédiction. Le pouvoir prédictif de l’explication présuppose la bi-univocité¹² du lien qui rattache chaque antécédent à un conséquent. Cela ne suppose pas la réversibilité temporelle des lois de la physique (remonter dans le temps)

¹². Bi-univocité signifie qu’il n’y a qu’une seule façon de déduire le conséquent de l’antécédent et, réciproquement, de remonter du conséquent à l’antécédent.

mais leur irréversibilité permet de remonter d'un conséquent à un antécédent. Cela est possible lorsque les lois sont déterministes et sous certaines conditions. C'est le cas pour la mécanique de Newton (en tout cas, c'est ce que l'on pensait à son époque, la théorie du chaos n'existait pas encore). C'est-à-dire, connaissant l'état de l'univers à un instant donné, les lois déterministes permettent de connaître son état à tout instant passé ou futur.

Lorsque les lois sont indéterministes (cas de la désintégration d'atome : on ne peut pas prédire avec exactitude que le moment de la désintégration sera à l'instant t) ou bien qu'elles sont déterministes mais les phénomènes chaotiques (cas de la mécanique de Newton ; le système chaotique le plus simple est le fameux système à trois corps : Soleil-Terre-Lune). Les lois sont déterministes, mais notre connaissance du système n'étant pas d'une précision infinie, les prédictions (tant pour le futur que pour le passé) sont limitées sur de courtes périodes de temps (pas de prédiction pour un temps infini).

Dans ce cas, trois possibilités se présentent :

- Le cadre descriptif (l'explication) porte désormais sur des probabilités et non pas directement sur les événements. Un antécédent a une probabilité de produire un effet.
- L'explication auto-suffisante (René Thom) : la loi permet d'expliquer les événements connaissant les causes mais il y a impossibilité de prédire car il existe un facteur aléatoire (ex : évolution des espèces).
- La prédiction auto-suffisante : connaissant l'événement à produire, on contraint le formalisme pour qu'il produise cet événement. Cela s'appelle la *reconstitution téléonomique*. Cette approche est critiquable, mais elle a un lien avec les *histoires consistantes de Griffiths*¹³.

1-1-6 Événements, propriétés, relations. Une théorie stochastique (*i.e.* qui traite d'événements aléatoires) ordinaire est prédictive car elle fournit la probabilité d'apparition d'événements. La Mécanique Quantique n'est pas une théorie stochastique ordinaire car ses prédictions sont subordonnées à l'interposition d'un appareillage instrumental. Elle ne fait pas de prédictions sur tel ou tel événement, mais prédit tel événement s'il est mesuré de telle façon. Les théories classiques, déterministes ou non, font l'hypothèse tacite que les événements surviennent dans l'absolu (même s'il n'y a rien pour les mesurer). Les choses ont des propriétés. L'instrument de mesure ne fait que révéler ces propriétés. La Mécanique Quantique ne fait pas cette hypothèse. Locke aurait dit que

la Mécanique Quantique reflète une situation où les "qualités secondes" de ses objets ne sont sous-tendues par aucune "qualité première".¹⁴

La Mécanique Quantique ne dit rien sur un événement s'il n'y a pas le contexte expérimental associé à la mesure de cet événement. Une fois le contexte expérimental fixé, la Mécanique Quantique peut faire des prédictions probabilistes. L'instrument prédictif de la Mécanique Quantique peut être dit *pré-probabiliste* en ce sens qu'il ne permet pas de prédiction sans contexte expérimental. Tout se passe comme si aucun événement ne survient indépendamment de conditions expérimentales. Cet instrument est le vecteur d'état

¹³. On en reparlera plus loin (§ 1-3-8).

¹⁴. Les qualités premières sont des qualités déterminées dans l'absolu, comme les propriétés géométriques selon Descartes, alors que les qualités secondes, comme la couleur ou le goût, résultent d'une interaction entre les objets et les organes des sens (ou appareils de mesure).

ψ . Selon le contexte expérimental, les prédictions obtenues à l'aide du vecteur d'état ψ portent sur différents événements qui sont exclusifs en général. Ainsi ψ couvre plusieurs gammes de possibles, chaque gamme correspondant à un choix de contexte expérimental.

Kant avait dénoncé l'illusion d'appréhender les objets comme choses en soi alors qu'ils ne peuvent l'être que comme phénomènes. Il a déjà formulé l'idée de mettre sur le même plan les qualités premières et secondes. Ces qualités sont des prédicats qui "n'appartiennent pas aux choses en elles-mêmes, mais à leurs phénomènes seulement" (prolégomènes de Kant de la référence Kant (1783) p.53 de [3]). Cependant, en physique classique, la modification des séquences expérimentales ne change pas le résultat de la mesure d'un événement. Ainsi, formellement, le contexte expérimental peut être oublié et les qualités mesurées peuvent être vues comme appartenant à l'événement lui-même. Nous verrons que la Mécanique Quantique interdit cet oubli.

Dans le formalisme de la Mécanique Quantique, les valeurs attendues pour le résultat d'une mesure sont données par une *observable*. L'observable est un opérateur¹⁵ agissant sur le vecteur d'état ψ qui décrit le contexte expérimental. Comme son nom l'indique, l'observable est une quantité qui peut être observée lors d'une mesure. Contrairement à la mécanique classique, le résultat de la mesure dépend de l'ordre d'utilisation des appareils de mesure. Imaginons que l'on veuille mesurer deux observables A et B (par exemple, la position et la vitesse d'une particule). L'application de ces opérateurs A et B sur ψ s'écrit¹⁶

$$AB|\psi\rangle \quad (2)$$

qui signifie que A est observée après que B l'ait été. Les opérateurs ne sont pas de simples nombres. Une différence fondamentale est qu'ils peuvent ne pas commuter, c.-à-d. que $AB \neq BA$. C'est ce qui arrive en Mécanique Quantique. Ainsi la mesure de A après B sera différente de la mesure de A faite avant B .

Concrètement, aucune valeur de la position x d'un objet n'est reproductible si une mesure de la quantité de mouvement ($p = mv$) est intercalée entre deux mesures de x . L'argument avancé dans les années 30 par Heisenberg, Bohr est de dire que l'instrument perturbe l'état de la particule. La particule peut donc continuer de posséder des propriétés, la mesure ne permet pas de séparer les propriétés intrinsèques de la particule et celle de l'instrument. Cependant, cette explication ne peut pas être vérifiée expérimentalement puisqu'il faudrait pouvoir accéder aux propriétés non perturbées.

Et aussi le caractère philosophiquement peu convaincant d'une argumentation qui se sert d'un langage de propriétés absolues (celles de l'objet, perturbées, et celles de l'appareil, perturbantes) pour justifier la mise à l'écart des répondants algébriques des concepts de propriété et d'événements absolus dans la théorie physique.

Par la suite, Bitbol se propose de prendre comme point de départ

l'agnosticisme structural de la Mécanique Quantique à l'égard du concept de détermination propre.

15. Un opérateur est un être mathématique qui transforme un objet (ici le vecteur d'état) en un autre objet du même type (ici un autre vecteur d'état).

16. Nous reviendrons plus loin sur les observables.

1-1-7 Prédire, point final Les qualités premières sont utilisées pour l'explication des phénomènes : ceux-ci sont la conséquence de ces qualités premières et de lois. Sans elles, que signifie expliquer ?

S'il n'est plus possible de décrire la suite d'événements, on peut suivre l'évolution de l'instrument prédictif. L'instrument mathématique de la Mécanique Quantique est un calcul de probabilités qui ne s'appuie plus sur la vision géométrique des formes (à la Descartes) et ne dérive plus d'aucun cadre descriptif. Ainsi Bitbol propose de débarrasser les prédictions de la Mécanique Quantique de l'explication et de la description. Pourtant la Mécanique Quantique décrit *quelque chose* : elle décrit l'évolution de l'instrument prédictif lui-même, le vecteur d'état. On peut être tenté de voir dans le vecteur d'état une description d'entités cachées. En effet, il existe une correspondance probabiliste, entre ψ et les résultats expérimentaux, qui est la règle de Born¹⁷. Mais cette façon de voir n'est pas satisfaisante selon Bitbol : c'est seulement la façon de voir le vecteur d'état qui change, mais cela n'explique pas pourquoi les phénomènes doivent être décrits par la Mécanique Quantique.

1-2 Le domaine des possibles La théorie classique des probabilités de Kolmogorov basée sur la logique classique (voir Annexe A) ne s'applique pas à la Mécanique Quantique. La logique classique travaille dans une gamme de possibles unique. La Mécanique Quantique considère plusieurs gammes de possibles, et donc plusieurs logiques. Une proposition est restreinte à une logique.

1-2-2 Une expérience de pensée, version classique Commençons par l'expérience du tirage de boules dans une urne avec "remise" des boules dans l'urne après tirage. Le but du jeu est de connaître les chances de tirer un certain type de boule. Il y a deux types de boules : des rouges (R) et des blanches (B).

Pour avoir un contexte proche de celui dans lequel se déroule les expériences quantiques, on suppose que le tirage n'est pas fait à la main, mais qu'un appareil projette les boules une à une en dehors de l'urne de façon aléatoire. De même, on suppose que la couleur n'est pas vue à l'oeil nu, mais grâce à une caméra reliée à un ordinateur. Lors d'un tirage, l'ordinateur affiche à l'écran : le tirage a eu lieu : rouge. On a ici deux informations. Ainsi on peut récupérer les événements où un tirage a eu lieu, mais pour lequel la caméra n'a pas détecté la couleur et les événements où la caméra envoie une couleur "parasite" alors qu'aucun tirage n'a eu lieu.

Ajoutons encore une caractéristique à l'événement en utilisant une caméra-radar qui détecte dans quelle direction est lancée la boule (droite ou gauche). À l'écran, on lira droite ou gauche. Malheureusement, un seul câble d'alimentation est disponible pour utiliser les deux caméras. Il nous est donc impossible d'avoir en même temps l'information sur la couleur et celle sur la position. Bien sûr, l'expérience ici est classique. La boule tirée a une couleur *et* une position, il n'y a donc qu'une gamme de possibles à chaque tirage :

couleur	position
B	d
B	g
R	d
R	g

17. La règle de Born relie le carré du module du vecteur d'état à la probabilité de trouver une particule en un point de l'espace. Voir l'équation (8) plus loin.

Par ex. ici, la probabilité d'obtenir une boule blanche est de 50% (1 chance sur 2) (4 types de tirage dont 2 avec 1 boule B)

1-2-3 Premières restrictions sur cette expérience de pensée Supposons maintenant que l'on ait accès qu'à l'urne, aux caméras et à l'ordinateur. On ignore l'existence des boules. Les résultats de l'expérience sont

tirage n° 1 :	R
tirage n° 2 :	R
tirage n° 3 :	B
...	

Au 1000ième tirage, on change de caméra :

tirage n° 1001 :	g
tirage n° 1002 :	d
tirage n° 1003 :	g
...	

Si l'on veut être prudent, les propositions décrivant l'expérience ne doivent pas faire intervenir la notion de boule. On ne sait pas si les mesures effectuées portent sur un objet de ce type, c.-à-d. ayant des caractéristiques propres (couleur et position).

- (a) Le sujet est une expérience numérotée, définie par la totalité du contexte c.-à-d. par la préparation de l'urne, par le tirage effectué et par la caméra choisie.
- (b) Le prédicat¹⁸ est l'occurrence d'un résultat dont le type dépend de la caméra choisie.

Ex: L'expérience n° 129 indique rouge.
L'expérience n° 1227 indique gauche.

En faisant cela, on agit comme s'il existait deux gammes de possibles distinctes. En effet, il est impossible de dire: L'expérience n° i indique rouge et l'expérience n° i indique droite, ou encore L'expérience n° i indique rouge ou l'expérience n° i indique droite, puisque l'expérience inclut dans sa définition le contexte expérimental et en particulier le type de caméra utilisé.

La conjonction et la disjonction de propositions portant sur le même sujet (expérience n° i), mais dont les prédicats appartiennent à des gammes de possibles différentes, sont interdites. Il en est de même pour les propositions contrafactuelles¹⁹. Si l'expérience n° i avait été faite, elle aurait donné rouge ou si l'expérience n° i avait été faite, elle aurait donné gauche.

Bien que chacune de ces deux propositions semblent avoir le même sujet (expérience n° i), les expériences de ces deux propositions sont différentes car elles ont un contexte expérimental différent. Remarquons que l'énoncé: si l'expérience n° i avait été faite, elle aurait donné rouge est possible. C'est la conjonction ou disjonction de deux énoncés appartenant à des gammes de possibles distinctes qui n'est pas possible.

Il n'y a pas une expérience avec deux prédicats mais deux expériences bien distinctes. La probabilité d'obtenir B est la probabilité d'obtenir B si l'expérience est l'expérience portant sur la couleur.

¹⁸. **Définition** : ce qui est dit d'un objet dont on parle (sujet).

¹⁹. Propositions au mode conditionnel dont les conditions sont contraires aux faits.

exp. couleur	exp. position
B	d
R	g

TAB. 1 – *Les deux gammes de possibles.*

1-2-4 Multiplicité des contextes, unité de la logique Il y a quatre types de circonstances qui permettent d'unifier les gammes de possibles.

1. Unification du contexte expérimental : en plus des deux caméras spécifiques, on utilise une caméra qui voit à la fois la position et la couleur. La logique est élargie, une expérience n° i peut donner une couleur et/ou une position.
2. Conjonction des contextes expérimentaux : on utilise seulement les deux caméras spécifiques, mais il est possible de les utiliser en même temps. L'expérience n° i inclut dans sa définition une conjonction des contextes expérimentaux, elle peut donc être caractérisée par une conjonction des prédicats de l'un et de l'autre de ces contextes.
3. Indifférence des résultats à l'ordre séquentiel de la mise en opération des contextes expérimentaux : les deux caméras peuvent être échangées très rapidement pendant une même expérience.
4. Sensibilité prévisible à l'ordre chronologique d'intervention des contextes : si les résultats dépendent de l'ordre séquentiel de la mise en opération des contextes expérimentaux, mais que cette dépendance est prévisible.

1-2-5 Un langage décontextualisé Dans le langage de tous les jours, les sujets des propositions n'incluent pas de contexte expérimental dans leur définition. Avec le langage courant, l'expérience n° i n'est plus le porteur de prédicats couleur et position, mais un certain objet (une boule) qui possède en même temps une couleur et une position. Le pré-supposé de l'existence d'une boule permet d'unifier les contextes.

Un exemple : un contexte expérimental est donné par la mesure de l'élasticité de la cire solide à 20°C. Un autre contexte serait celui de la mesure de la viscosité de la cire à 100°C. Les contextes expérimentaux sont différents à cause de la température, mais les valeurs obtenues lors de ces mesures sont considérées comme des propriétés de la cire.

Ce faisant, le physicien anticipe le point 3 ou le point 4 s'il y a un phénomène d'hystérésis. Dans ce dernier cas, il anticipe que les valeurs obtenues sont dues à l'expression de propriétés plus fondamentales (arrangement des atomes...) qui relèveraient d'un seul contexte expérimental. Cette situation d'anticipation est vue comme provisoire et sera certainement résolue par le progrès de la physique.

La raison de cette anticipation est la volonté d'objectivation. Le discours du physicien porte sur des objets et s'affranchit ainsi du contexte expérimental. La disparition de tout particularisme associé au contexte permet une communication. Sans cette décontextualisation, comment les physiciens pourraient-ils communiquer ? Il faut bien parler le même langage pour se comprendre.

Le langage non contextuel d'objets et de propriétés qui nous est familier repose sur une hiérarchie d'anticipations concernant l'unité de la gamme de possibles

qui définit une logique; il demeure donc suspendu à un échec toujours envisageable des conduites anticipatrices, fût-ce dans une fraction limitée de son champ d'exercice.

[...]

Si l'anticipation d'une unicité de la gamme de possibles devait s'avérer vaine, une tension apparaîtrait bien dans le discours de ceux qui se trouvent professionnellement au plus près de la fracture ; mais cette tension resterait longtemps diffuse parce qu'un langage pré-formé par une logique unifiée est incapable de servir à la formuler, et à plus forte raison incapable de servir à exprimer le procédé de sa résolution [3, p. 49].

1-2-6 Faut-il garder le silence? En fait, le langage que nous utilisons est un langage d'objets et de propriétés. Il n'y a jamais eu de langage contextuel. Notre langage est difficilement utilisable pour faire des descriptions contextuelles. Dans l'expérience de l'urne, les caméras définissant le contexte sont elles-mêmes définies de façon non contextuelle: la caméra de position (sujet) détecte des positions (indépendamment de tout contexte). Par ailleurs, pour représenter l'expérimentateur face à une disjonction de la gamme des possibles, il a fallu supposer que celui-ci n'avait pas accès direct aux propriétés de boules microscopiques.

1-2-7 La Mécanique Quantique et la pluralité des contextes La Mécanique Quantique présente peut-être une telle disjonction de la gamme des possibles. En effet, des débats sur l'interprétation de la Mécanique Quantique ont eu lieu pendant 70 ans, montrant la difficulté de traduire les expériences à l'aide du langage courant. L'échec des langages non contextuels ne pourrait apparaître clairement dans le discours interprétatif formulé à l'aide du langage ordinaire.

Bitbol explique ici qu'il est intéressant de

suivre jusqu'au bout les conséquences du remplacement d'un langage unique et non contextuel par une pluralité de langages partiellement contextualisés,

même si les difficultés d'interprétation de la Mécanique Quantique ne prouvent pas que le langage ordinaire est inutilisable.

1-2-8 Questions et observables Les constituants du langage sont des propositions. Une

proposition affirme un fait, c.-à-d. la réalisation d'un certain état de choses parmi tous ceux qui sont possibles dans un contexte donné.

Une proposition peut être rattachée à une logique restreinte en la faisant précéder d'une question, et en montrant qu'elle est l'une des réponses de la liste prédéfinie par la question. Il ne faut cependant pas confondre le contexte expérimental (qui détermine une gamme de possibles) avec une question (qui ouvre une grille de réponses acceptables relevant d'une ou de plusieurs gammes). La question n'est pas indépendante du ou des contexte(s), mais elle n'en est pas la traduction univoque:

1. une question particulière peut imposer un découpage diversement modulé, plus ou moins fin, de l'ensemble des informations rendues disponibles par la mise en place d'*un* contexte expérimental;

2. elle peut être libellée de manière suffisamment large pour valoir dans *plusieurs* contextes qui, bien que distincts, aboutissent à des résultats *redondants* ;
3. elle peut enfin ouvrir d'emblée sur des réponses complexes, impliquant une conjonction d'informations obtenues dans plusieurs contextes expérimentaux aux résultats mutuellement *indépendants*.

Pour illustrer le cas 1, considérons un appareil qui mesure la coordonnée x (à la précision Δx près). Le type de questions que l'on peut poser dépend bien évidemment de sa constitution et de sa fonction. Exemple de questions :

- la valeur de x est-elle supérieure ou inférieure à 2 cm ?
- la valeur du carré de x est-elle comprise entre 1 et 25 cm² ?

Les propositions-réponses possibles peuvent se découper en une disjonction, conjonction ou négation de propositions élémentaires, comme par ex. “la valeur de x est comprise entre 0 et 0.1 cm *ou* entre 0.1 et 0.2 cm *ou* ...” Dans ce cas, les questions relèvent d'une même *observable* ou de diverses fonctions d'une même observable.

Un exemple du cas 2 où plusieurs contextes donnent des informations redondantes peut être le suivant : supposons que l'on mesure la distance parcourue par un corps par unité de temps (à l'aide d'une règle et d'un chronomètre). Un autre contexte expérimental est la mesure du décalage en fréquence des ondes émises par le corps en question (à l'aide d'un spectromètre à effet Doppler). Chaque contexte nous donne exactement la même chose, à savoir la vitesse de ce corps. La question qui synthétise les deux contextes expérimentaux est : “quelle est la vitesse de ce corps ?” Cependant, les choses se compliquent si les deux mesures ne peuvent pas être effectuées simultanément, si l'identité du corps sur lequel sont faites les mesures n'est pas sûre, si des mesures successives ne donnent pas des résultats strictement corrélés ... Il faut alors recourir à des hypothèses supplémentaires comme le fait la Mécanique Quantique.

Le cas 3 serait la mesure simultanée des 3 coordonnées spatiales (x,y,z) du centre de masse d'un objet. La question unifiant ces 3 contextes expérimentaux serait : “quelle est la position du centre de masse de ce corps ?” L'observable \mathbf{R} (correspondant au vecteur $\mathbf{r} = (x,y,z)$) s'identifie à la conjonction des 3 observables X,Y,Z .

Cette stratégie de conjonction unifie de proche en proche les observables et le langage expérimental correspondant. Elle a été poussée très loin en Mécanique Classique, mais elle est limitée à des ensembles d'observables dites “compatibles” en Mécanique Quantique.

1-2-9 Langages expérimentaux et logiques contextuelles booléennes Soit un contexte expérimental A , le langage qui ne contient que des termes se rapportant à ce contexte expérimental est noté L_A et la logique propositionnelle associée λ_A .

La logique propositionnelle λ_A traite de tous les états de choses mutuellement exclusifs rendus possibles par un contexte A donné.

Les opérations logiques entre les propositions du langage L_A se réduisent aux opérations de la théorie des ensembles entre les sous-ensembles de l'ensemble (des états de choses possibles). La logique λ_A est une logique classique et a la structure d'une algèbre de Boole (voir l'annexe A). Pour clarifier les choses, la structure booléenne peut-être vue comme l'ouverture ménagée par une question liée à un contexte expérimental (“ainsi ou autrement”), et le type de proposition-réponse (“il en est ainsi et pas autrement”). La logique de

chaque langage expérimental est une logique classique.

1-2-10 Langages méta-contextuels

Un langage méta-contextuel est un langage dont les propositions énoncent la mise en œuvre de contextes expérimentaux et énumèrent les états de choses que ces contextes rendent possibles.

Au contraire, dans un langage contextuel,

les propositions singularisent certains états de choses parmi ceux qui sont rendus possibles par *un* contexte expérimental.

La logique d'un langage méta-contextuel n'est pas booléenne en général. Voyons cela à l'aide de l'expérience des fentes d'Young (§ 2.2.2). L'expérience des fentes d'Young est composée d'une source (S), d'un cache opaque percé de deux fentes A et B, et d'un écran de détection. À ceci s'ajoutent des détecteurs non absorbants (carrés blancs de la Fig. 4) et des bouchons permettant de fermer les fentes (carrés noirs).

Aux quatre contextes expérimentaux présentés dans la figure 4 correspondent quatre langages expérimentaux L_A , L_B , $L_A \vee L_B$ et L_{AB} . Les propositions élémentaires du langage

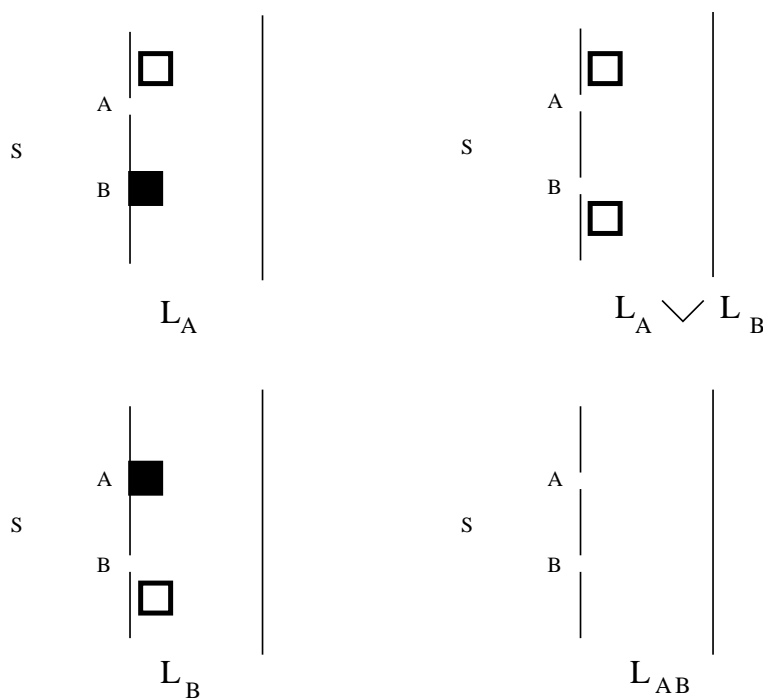


FIG. 4 – Les quatre contextes expérimentaux correspondant à l'expérience des fentes d'Young.

L_A sont du type: “le détecteur 1 a été activé, et un impact s’est produit sur l’écran au point d’abscisse $x \pm \Delta x$ ”. Le seul élément variable dans cette proposition est la valeur de x . Les propositions élémentaires du langage L_B sont du même type sauf qu’elles se réfèrent au détecteur 2. Celles de $L_A \vee L_B$ sont toutes celles de L_A et L_B . Enfin, celles de L_{AB} sont du type: “un impact s’est produit sur l’écran au point d’abscisse $x \pm \Delta x$ ”. Elles ne contiennent aucune mention au sujet des détecteurs. Le domaine du langage L_{AB} est plus

vaste que celui de $L_A \vee L_B$.

Théorème : *Dans l'ensemble de langages expérimentaux répondant aux diverses versions de l'expérience des fentes d'Young, la somme logique n'est pas distributive par rapport au produit logique.*

La démonstration de ce théorème est faite dans l'annexe 1 de [3]. Il prouve que l'ensemble $\{L_0, L_A, L_B, L_A \vee L_B, L_{AB}\}$, où L_0 est le langage ne contenant aucune proposition, n'a pas une structure d'algèbre de Boole, qui caractérise la logique classique.²⁰

1-2-11 Les langages expérimentaux et leur terminologie épurée Dans le paragraphe précédent, les langages expérimentaux n'ont pas parlé de “particule” passant par une fente ou l'autre, ni d'ondes... Les termes du langage étaient des termes génériques comme *préparation* (la source et le cache étant regroupés dans cette catégorie), *opération expérimentale* ou opération de mesure (qui concerne les détecteurs et l'écran) et *résultats* (états de choses rendus possibles par l'opération expérimentale, comme par ex. l'activation de tel détecteur ou l'impact sur l'écran).

Cette approche possède cependant un défaut de consistance interne. Elle espère obtenir des informations sur le système physique (en faisant interagir celui-ci avec des appareils de mesure) tout en censurant les questions portant sur ce système physique.²¹

1-2-12 Un clivage microscopique-macroscopique ?

La stratégie qui consiste à suspendre le jugement à propos de l'objet d'investigation, mais pas à propos du moyen instrumental de l'investigation, tourne court, car l'application du critère principal qu'elle se donne pour tracer une limite contredit son propre aboutissement.

Quelle bonne raison y a-t-il pour distinguer le microscopique et le macroscopique ? Et surtout, que faire des cas intermédiaires, où s'arrête le microscopique et où commence le macroscopique ? Une distinction pourrait être celle-ci : En fait, l'expérimentateur n'a pas besoin d'affirmer l'existence des objets macroscopiques que sont ses appareils de mesure ; il en parle et il s'en sert, au contraire des objets microscopiques. Une autre distinction est la différence entre un événement et un fait.

Les événements sont, comme les corps matériels, “quelque chose dans le monde”, les “faits” se limitent à être ce que les propositions tenues pour vraies énoncent, et les “états de choses” correspondent à ce que les propositions d'un langage donné *peuvent* énoncer.

À l'opposé de l'événement, le fait ne prétend pas constituer une donnée immuable. Prenons un exemple : là où les physiciens voyaient des trajectoires corpusculaires dans les chambres à bulles de Wilson (voir le § 2.1), Heisenberg n'y voyait plus à la fin 1926, qu'un pointillé assez irrégulier de gouttelettes d'eau. L'identification du fait à une trajectoire le rattachait à l'ancien paradigme de la mécanique classique.

En général, les faits commencent à être remis en cause lorsqu'il se prépare un changement de paradigme.

20. Note personnelle : Comment la diffraction dans le cas d'une seule fente est elle formulée par un langage contextuel ?

21. Note personnelle : Ce qui est fait jusqu'ici, c'est de montrer que le langage peut supporter la structure de la Mécanique Quantique, mais le prix à payer est que l'on ne sait plus très bien de quel objet on parle.

1-2-13 L'ombre portée du concept de corpuscule matériel dans le langage expérimental Le second écueil qui s'oppose à une terminologie purement instrumentale est le suivant. L'énoncé de l'expérience ou de ses résultats semble presque toujours requérir la mention de son objet, et non pas seulement celle de ses instruments. Ceci reflète une confusion historique. En effet, la physique classique a largement utilisé le concept de corpuscule qui synthétise trois éléments : il était

- détenteur d'une multiplicité numérique,
- d'une identité servant de critère à la reproductibilité du résultat de chaque expérience,
- et d'une capacité à servir de support à plusieurs déterminations.

Ces actes de dénombrement, de dénomination, et de prédication sont des actes courant de la vie quotidienne et ont une forte tradition dans les sciences entre le 17^{ième} et 19^{ième} siècle, mais rien n'indique que ces éléments doivent rester assemblés, partout et toujours. Il faut donc être prudent et faire un inventaire de ces trois corrélats du concept de "chose".

Commençons par le nombre. Les expériences de physique microscopique sont typiquement des faits discontinus :

- impacts sur un écran absorbant,
- décharges électrostatiques dans un compteur Geiger,
- diminutions discrètes de la charge électrique en cas de faible éclairnement d'une cathode (effet photoélectrique),
- grappes de gouttelettes dans la chambre à bulles de Wilson...

Ces faits sont le résultat de deux types de mesure différents. Les *mesures destructives*, qui s'accompagnent d'un transfert irréversible de la totalité de l'énergie rendue disponible par la préparation vers le dispositif de mesure²², et les *mesures non destructives* pour lesquelles le transfert d'énergie est partiel.

Évitons d'employer le langage des physiciens qui présuppose un caractère corpusculaire des objets quantiques. Intéressons-nous seulement à l'observable nombre. Toutes les mesures destructives peuvent servir à mesurer cette observable. Un impact sur un écran est une telle mesure. Il permet de connaître l'observable position, mais aussi l'observable nombre qui vaut 1 pour chaque impact distinct. En revanche, une mesure faite par une chambre de Wilson ne permet pas de déterminer l'observable nombre. En effet, certaines séries de N gouttelettes d'eau se termine par un seul impact sur un écran absorbant. Ainsi, les mesures non destructives ne permettent pas toujours de déterminer l'observable nombre.²³

Définition : Une "mesure du premier ordre" est une mesure non destructive dont le résultat est reproductible en cas de répétition de l'expérience. Cette définition est importante car elle permet de définir ce qu'est une mesure maintenant que le jugement sur l'objet de l'expérience est suspendu (maintenant que nous n'avons plus d'objet porteur de propriétés). En effet, dans le langage classique, une mesure est une "traduction" fidèle d'une des propriétés de l'objet.

Définition : Une observable est "complètement identificatrice" si son nombre de valeurs (ou de plages de valeurs) complètement distinctes est identique à la valeur de l'observable

22. Avec le langage classique, les physiciens disent que la particule est détruite lors de la mesure. Souvenons-nous que $E = mc^2$ signifie que la particule peut être transformée en énergie.

23. La théorie quantique des champs et la théorie de la seconde quantification (voir § 5-2-8), qui confèrent à l'observable nombre le même statut qu'aux observables de la Mécanique Quantique standard donnent des indications sur ce que pourrait être les moyens de mesures non destructives de cette observable.

nombre.

En répétant immédiatement la mesure simultanée de l'observable A et de l'observable complètement identificatrice B dans une même cavité, on doit trouver le même résultat pour A si l'on obtient le même résultat pour B .

L'exemple le plus courant d'observable B est l'observable position.

Ce critère de reproductibilité d'une mesure vise à servir de substitut opératoire à celui de reproductibilité sur une même particule ou sur un même système physique. Mais ce critère est assez faible car il n'est valable que pour un temps limité. Ses limitations se traduisent par des conséquences expérimentales que le vocabulaire habituel des physiciens rattache à l'indiscernabilité des particules (voir la figure 5).

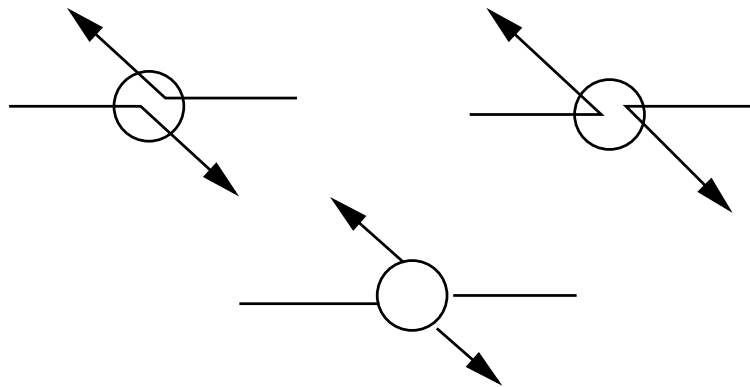


FIG. 5 – Indiscernabilité des particules lors d'une collision. En Mécanique Quantique, n'ayant plus la notion de trajectoire clairement définie, il n'est pas possible de savoir quelle particule est partie vers la droite. En mécanique classique, on sait ce qui se passe dans le cercle alors que c'est impossible en Mécanique Quantique en raison du principe d'incertitude de Heisenberg.

Il existe d'autres observables (la masse, la charge, le module du spin...) qui s'apparente à des propriétés possédées par quelque chose. Les expériences pour mesurer ces observables, dites *supersélectives*, n'ont en effet jamais conduit à des phénomènes d'interférence. Ces observables sont compatibles entre elles et avec les autres observables²⁴. Du fait de l'indépendance mutuelle des valeurs mesurées, de leur invariance quelle que soit la séquence de contextes expérimentaux employés, d'un certain degré de permanence permettant de s'assurer de la reproductibilité des évaluations, et de la possibilité de conjointre les contextes, on est tenté de qualifier de propriétés d'un objet, identifiable et réidentifiable, les valeurs de ces observables. En fait, ces observables ne suffisent pas à identifier une particule, mais elle définissent une classe de particules. Elles peuvent être prises en compte, sans pour autant nécessiter l'emploi d'une ontologie d'objets.

Cela fait apparaître rétrospectivement la singularité de la physique classique où rien n'empêchait de faire confluer présomptivement la liste des critères opé-

24. Note personnelle : J'ai souvenir d'un séminaire à l'IPCMS de Strasbourg concernant des expériences où le spin et la charge soi-disant appartenant à une même particule se séparent (à revoir). Ceci peut probablement s'interpréter comme la séparation de deux quasi-particules, l'une emportant le spin, l'autre la charge. Ceci pourrait s'expliquer classiquement si l'on comprend bien la notion de quasi-particule, mais je n'en parlerai pas plus avant ici.

ratoires dans un concept de corps matériel isomorphe à celui de la “chose” de la vie courante.

1-3 Probabilités, projections, et prédictions

1-3-1 La pluralité des concepts de probabilité Il existe 5 conceptions de la probabilité (voir Annexe C).

1-3-2 Objectivité, subjectivité, et probabilité La théorie de la connaissance classe ces différentes conceptions en *subjectivistes* et *objectivistes*.

1-3-3 Les probabilités entre épistémologie et ontologie Les probabilités peuvent être classées en épistémologiques et ontologiques : elles expriment nos capacités bornées de connaître, et non pas seulement ce qui *est*.

L'interprétation épistémique de la Mécanique Quantique, favorisée par l'école de Copenhague, a eu pour conséquence involontaire de lancer un programme de recherche sur les variables cachées (voir § 4-5).

De l'autre côté, une interprétation ontologique des probabilités quantiques signifierait qu'on a réussi à établir le caractère indéterministe des véritables lois de la nature “telle qu'elle est”. Or cette question de savoir si les lois sont déterministes ou indéterministes est une question indécidable. Le chaos peut être déterministe et ses phénomènes imprévisibles. Réciproquement, des phénomènes prévisibles peuvent très bien être le résultat d'événements aléatoires.

1-3-4 Temps et probabilités Un autre critère de classification des probabilités est la dissymétrie entre passé et futur, constat et attente. Les probabilités 2 et 5 de l'annexe C sont du type attente. Dans le groupe des probabilités qui sont plutôt des constats, on peut faire la distinction entre un constat des successions d'événements (probabilité 1 et 3) et un constat sur ce qui arrive à un instant donné (probabilité 4). L'hypothèse ergodique est ce qui raccorde ces trois types de probabilité.

Définition : *L'hypothèse ergodique consiste à admettre qu'un système physique passe successivement par tous les états qui, lui étant accessibles de façon équiprobable à un instant donné, se trouvent dénombrés par le procédé ensembliste.*

1-3-5 Les probabilités et l'aventure de la projection La Mécanique Quantique s'est édifiée en associant des composantes issues de la physique classique à des composantes propres, totalement inédites. Les définitions classiques des variables étaient conservées, mais elles s'articulaient selon des “postulats quantiques”. Les règles de correspondance de Bohr servaient de raccord entre mécanique classique et Mécanique Quantique.

De nos jours, plusieurs observables sont sans équivalent classique, comme le spin, le “charme”, la “couleur”. Il apparaît que le principe de correspondance est une mise en œuvre déguisée des principes de symétrie anciens et reconnus qui forment l'armature de la physique classique. Il s'agit des énoncés d'invariance par translation dans l'espace, par translation dans le temps, et par rotation dans l'espace, que le théorème de Noether²⁵ associe

25. Théorème de Noether : Si les équations du mouvement sont invariantes par une transformation, alors il existe une quantité qui se conserve.

respectivement aux lois de conservation de la quantité de mouvement, de l'énergie, et du moment cinétique.

1-3-6 Probabilités, événements, et principe de bivalence La proposition “ p va probablement se produire” énonce quelque chose sur l'avenir, mais n'énonce rien sur l'événement p .

Définition : *Le principe de bivalence s'énonce ainsi : “Quelque soit la proposition p , p est soit vraie soit fausse”.*

Le calcul classique, kolmogorovien, des probabilités repose sur l'hypothèse de la validité universelle du principe de bivalence. Les conséquences de cette hypothèse sont considérables. L'une d'elles est la suivante : La probabilité $P(r \wedge (s \vee \neg s))$ peut être calculée en utilisant ce principe ou en utilisant la loi de distributivité. Selon le principe de bivalence, $s \vee \neg s = t$, où t est une tautologie (proposition toujours vraie). $\forall r, r \wedge t = r$ et donc

$$P(r \wedge (s \vee \neg s)) = P(r). \quad (3)$$

Selon la loi de distributivité de la conjonction par rapport à la disjonction, on a $r \wedge (s \vee \neg s) = (r \wedge s) \vee (r \wedge \neg s)$ et par conséquent

$$P(r \wedge (s \vee \neg s)) = P((r \wedge s) \vee (r \wedge \neg s)). \quad (4)$$

Les propositions $(r \wedge s)$ et $(r \wedge \neg s)$ étant mutuellement exclusives, le 2ième axiome de la théorie de Kolmogorov donne :

$$P((r \wedge s) \vee (r \wedge \neg s)) = P(r \wedge s) + P(r \wedge \neg s). \quad (5)$$

Combinant les expressions (3), (4) et (5), on a

$$\begin{aligned} P(r) &= P(r \wedge s) + P(r \wedge \neg s) \\ P(r) &= P(r|s)P(s) + P(r|\neg s)P(\neg s), \end{aligned} \quad (6)$$

où $P(r|s)$ est la probabilité de r conditionnée par la réalisation de s . Cette égalité relève d'une *structure probabiliste disjonctive*. La violation de l'équation (6) pourrait être interprétée comme l'indice d'une possible mise à l'écart du principe de bivalence. On verra justement que la Mécanique Quantique ne vérifie pas cette équation²⁶.

1-3-7 Que serait un monde sans le principe de bivalence ?

L'affirmation de la validité universelle du principe de bivalence, y compris pour les propositions portant sur le futur, n'implique ici en rien une option déterministe ; elle ne fait que traduire la certitude qu'à un moment ou à un autre, le cours des événements fait l'objet d'un constat, et que ce constat atteste ou réfute rétroactivement toute proposition ayant anticipé sur lui.

L'idée que les propositions portant sur le futur sont régies par le principe de bivalence ne perdrait tout point d'appui que si l'invalidité du principe de bivalence s'étendait aux propositions correspondantes qui portent sur le présent ou sur l'accompli.

26. Note personnelle : Qu'en est-il des propositions indécidables ? Ont-elles quelque chose à voir ici ?

Le principe de bivalence serait à coup sûr invalidé pour les propositions portant sur le futur si la valeur de vérité des propositions factuelles sur lesquelles reposent les raisonnements *ex post facto* dépendent des moyens de leur attestation.

Il existe trois types de monde pour lesquels la valeur de vérité et le sens des propositions énonçant un fait peuvent être suspendus à la disponibilité d'un moyen d'attestation :

- le monde est notre œuvre, nous en sommes le créateur,
- le monde réel n'est pas découpé par lui-même en événements mutuellement exclusifs,
- le monde ne possède pas de parties indépendantes les unes des autres ; chaque événement est unique et non reproductible.

1-3-8 Un calcul des probabilités sans événements Selon une conception provenant de l'école de Copenhague, la structure de la Mécanique Quantique contraint à considérer la valeur de vérité des propositions comme indissociable des conditions expérimentales de leur attestation. Elle est l'une de ces théories probabilistes qui ne reposent pas sur le principe de bivalence. "Aucun phénomène élémentaire n'est un phénomène tant qu'il n'est pas un phénomène observé". R. Omnès récuse l'applicabilité du principe de bivalence pour les propositions qui énoncent les propriétés qu'avait le "système" entre deux mesures et qu'il *aurait* manifesté *si* une mesure intermédiaire avait été faite. Ces propositions ne sont ni vraies ni fausses²⁷, contrairement aux propositions qui énoncent le résultat d'une mesure. On peut définir un critère de fiabilité pour ces propositions :

Définition : *Les propositions qui attribuent des propriétés au "système" entre deux mesures sont fiables à la condition suivante énoncée au mode conditionnel contrafactuel : si un moyen d'attestation avait été utilisé afin de mettre en évidence ces propriétés, rien n'aurait été changé quant à la probabilité du résultat de la mesure finale calculée à partir de la mesure initiale.*

Définition : *Une histoire consistante de Griffiths est une des séquences d'événements signifiées par une suite de propositions fiables intercalées entre deux propositions vraies.* En général, la Mécanique Quantique autorise plus d'une histoire consistante entre deux mesures. Autrement, le critère de fiabilité serait identique au critère vérité.

Reprenons l'expérience des fentes d'Young pour illustrer en quoi la structure de la Mécanique Quantique défie le principe de bivalence. Les propositions de cette expérience sont (en utilisant un langage d'objet) :

- \mathbf{x} = "l'objet émis par la source S a frappé l'écran au point x ",
- \mathbf{a} = "l'objet émis par la source S et ayant frappé l'écran au point x est passé par la fente A ",
- $\neg\mathbf{a}$ = "l'objet émis par la source S et ayant frappé l'écran au point x n'est pas passé par la fente A ",

On verra plus loin (équ. (16)) que la formule quantique n'est pas

$$P(\mathbf{x}) = P(\mathbf{x}|\mathbf{a})P(\mathbf{a}) + P(\mathbf{x}|\neg\mathbf{a})P(\neg\mathbf{a}), \quad (7)$$

mais relève d'une structure probabiliste non disjonctive, qui prévoit une figure d'interférences en parfait accord avec l'expérience. Il faut alors remettre en question une ou plusieurs des prémisses qui ont conduit à cette formule (7) invalidée.

27. Note personnelle : Les propositions ni vraies ni fausses sont-elles du type indécidables ou bien d'un autre type (qui serait contextuel) ? Y a-t-il un rapport entre des propositions contextuelles et des propositions indécidables ?

La première option consiste à récuser les lois de distributivité de la conjonction et de la disjonction (logique quantique de Birkhoff et von Neumann).

La seconde option (Friedman et Putnam) rejette en bloc toutes les prémisses, mais elle n'explique en rien l'inadéquation des probabilités classiques aux phénomènes microscopiques.

La troisième option récuse la validité du principe de bivalence pour les *seules* propositions qui renvoient à des événements définis en l'absence de référence à la mise en place de l'instrument de leur attestation. Elle est très plausible puisque le principe de bivalence réapparaît lorsque des détecteurs sont placés sur les fentes d'Young, contexte expérimental dans lequel disparaissent les interférences et la formule probabiliste redevient classique.

2- La Mécanique Quantique comme schéma prédictif contextuel Pour éviter de tomber dans les impasses interprétatives de la Mécanique Quantique, il vaut mieux développer une théorie minimaliste, instrumentaliste, qui permettra de révéler le matériau d'une éventuelle reconstruction ontologique.

Selon Bitbol,

le but minimal d'une théorie physique consiste à fournir des prévisions concernant des résultats de mesures, à partir d'une préparation donnée.

La notion de préparation remplace la notion de mesure initiale des théories de la prévision de J.L. Destouches et P. Destouches-Février. En effet, lors d'expériences, il n'y pas toujours une mesure initiale directe qui effectuée. Prenons l'exemple de la mesure de la polarisation de la lumière émise d'une source. Une série de préparations consiste à émettre de la lumière à faible intensité (quantum d'énergie par quantum d'énergie) vers un polariseur d'axe vertical P1 (une préparation pour chaque quantum). Une première série de mesures est effectuée en plaçant un second polariseur P2 orienté soit verticalement (comme P1) soit horizontalement (avec un angle de 90° par rapport à P1) et en observant le résultat de l'émission des photons sur un écran E situé derrière le dispositif (voir la figure 6). Dans le cas où P1 et P2 sont orientés tous les deux verticalement, on observe systématiquement un impact sur l'écran : la probabilité de passage du photon est 1, en langage de physicien. Dans le cas où P1 et P2 forment un angle de 90° , il n'y a jamais d'impact : la probabilité de passage du photon est nulle. Les résultats sont ici strictement reproductibles.

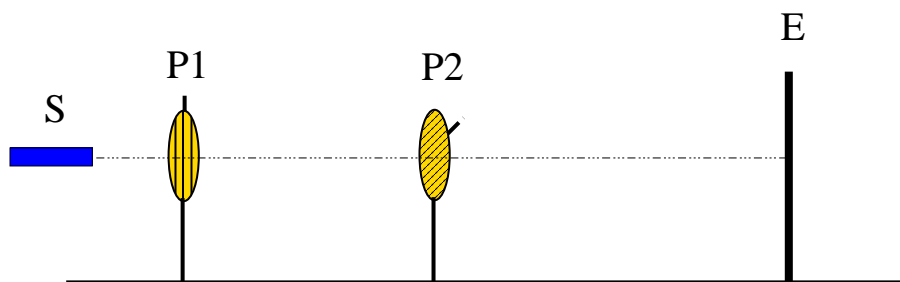


FIG. 6 – *Mesure de la polarisation de la lumière. Les photons émis d'une source S sont polarisés en traversant le premier polariseur (P1) et la probabilité de passage à travers le second polariseur (P2) (orienté d'un angle α par rapport au premier) est mesurée en observant le nombre de fois où le photon atteint l'écran E rapporté au nombre de photons émis.*

On effectue maintenant une seconde série de préparations où les mesures ne sont plus

des tests mais des mesures de la variable au sujet de laquelle il faut donner des prédictions. Le polariseur P2 est orienté d'un angle α par rapport à P1. Il s'agit de mesurer la polarisation selon la direction α . Mais, dans cette expérience, la mesure de la polarisation ne peut être qu'une mesure probabiliste, puisque le résultat de chaque mesure est soit un impact sur l'écran, soit l'absence d'impact sur l'écran. Cette procédure en deux étapes (une première série de mesures *tests* suivie d'une seconde série de mesures) équivaut formellement à la séquence mesure initiale - mesure finale des théories de la prévision, sauf que la mesure initiale, qui est la mesure test *si* elle avait été effectuée, n'est disponible que contrafactuellement. Or la manipulation des propositions contrafactuelles est chose délicate, comme on l'a vu au § 1-2-3.

Les prédictions dépendent de trois éléments constituant chaque expérience :

- le type de préparation, éventuellement caractérisé par une série de mesures tests préliminaires,
- le laps de temps et les conditions physiques qui séparent le lieu et l'instant de la préparation du lieu et de l'instant de la mesure de la variable à prédire,
- le type de variable dont il faut prédire le résultat de la mesure.

À ces éléments, la Mécanique Quantique fait correspondre

- un vecteur d'un espace de Hilbert (vecteur d'état),
- une équation d'évolution (équation de Schrödinger),
- un opérateur dans l'espace de Hilbert (une observable).

L'exposé simplifié de la Mécanique Quantique de Bitbol a pour ambition de constituer un point de départ utile pour la réflexion philosophique en suivant les étapes de cette correspondance.

2-2 Préparer

2-2-1 Vecteurs d'état et préparations Le paragraphe 1-3-8 a montré que la Mécanique Quantique peut se voir 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 (comme) un calcul d'évaluations probabilistes catégoriques portant sur les éléments d'une gamme pré-données d'événements possibles.

Il faut pour cela un instrument mathématique polyvalent qui permet de dériver autant de listes de probabilités que de listes de faits correspondant aux types d'expériences possibles à l'issue de la préparation. Il faut en plus que chacune des listes de probabilités vérifie les axiomes de la théorie des probabilités de Kolmogorov. Bitbol, sans le développer, prétend que ces contraintes suffisent à déterminer le type d'instrument mathématique ayant les caractéristiques voulues et qu'il existe des théorèmes qui établissent la quasi-unicité de l'instrument qui va être présenté ci-après.

Il nous faut un espace abstrait \mathbf{H} ayant autant de dimensions (en supposant leur nombre fini pour simplifier²⁸) que de faits élémentaires d'une certaine gamme de possibles expérimentaux.²⁹

²⁸. Voir les remarques de Bitbol au sujet d'un nombre infini de dimensions [3, p. 147].

²⁹. Note personnelle : Retenons bien que le nombre de dimensions de l'espace \mathbf{H} est relié au nombre de possibilités pour une gamme de possibles donnée.

Définition : *Un événement contextuel (ou plus simplement un événement) est un fait.* L'événement contextuel élémentaire qui signifie que la valeur a_i a été obtenue lors de la mesure de la variable A est noté e_{ai} .

Un événement élémentaire particulier e_{ai} sera représenté dans l'espace \mathbf{H} par un axe de coordonnées qui a pour origine le point O , et qui est orthogonal aux axes représentant les autres événements élémentaires de la même gamme. Le vecteur unité de l'axe représentant l'événement e_{ai} est noté $|\mathbf{a}_i\rangle$ (voir la figure 7).

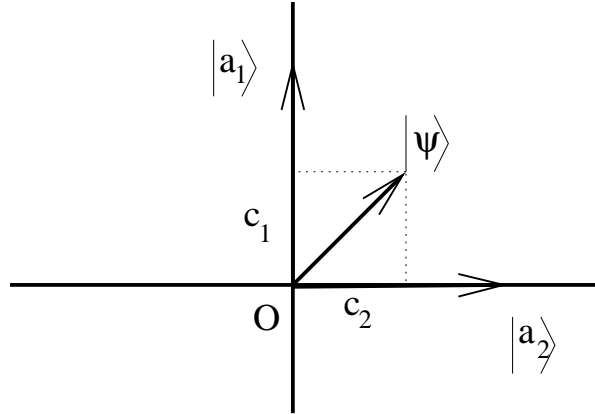


FIG. 7 – *L'instrument mathématique de la Mécanique Quantique.*

La gamme entière des événements élémentaires possibles dans le contexte d'une mesure de la variable A est représentée par un système de n axes orthonormés et de n vecteurs de base associés dans l'espace \mathbf{H} .

L'instrument mathématique de la Mécanique Quantique est un vecteur de l'espace de Hilbert, de norme unité, noté $|\psi\rangle$, et appelé vecteur d'état. Il permet, à partir d'une préparation donnée, de calculer non seulement la probabilité des événements de la gamme A , mais aussi celle des événements de n'importe quelle autre gamme B, C, D, \dots représentable par un système d'axes différents dans le *même* espace de Hilbert. On verra le cas de plusieurs gammes d'événements au § 2-4.

Notation : La projection de $|\psi\rangle$ sur $|\mathbf{a}_i\rangle$ se note³⁰ $\langle \mathbf{a}_i | \psi \rangle$.

Les probabilités d'événements sont données par les carrés des projections. La probabilité que l'événement e_{ai} surviennent est le module carré du résultat de la projection du vecteur d'état $|\psi\rangle$ sur l'axe parallèle à $|\mathbf{a}_i\rangle$ (voir Fig. 7).

$$P(a_i, \psi) = |\langle \mathbf{a}_i | \psi \rangle|^2 = |c_i|^2 \quad (8)$$

Cette règle de calcul est connue sous le nom de *règle de Born*.

Allons plus loin. La probabilité d'un événement aléatoire au sens large (donné par une disjonction d'événements élémentaires) $e = e_{ai} \vee e_{aj} \vee e_{ak} \vee \dots$ nécessite la projection de $|\psi\rangle$ sur le sous-espace, noté $h_{ijk\dots}$, de l'espace \mathbf{H} composé des axes $|\mathbf{a}_i\rangle, |\mathbf{a}_j\rangle, |\mathbf{a}_k\rangle, \dots$

Définition : *Le projecteur $\mathbb{P}_{ijk\dots}$ est l'opérateur de projection qui permet de projeter un vecteur de l'espace \mathbf{H} sur le sous-espace $h_{ijk\dots}$.*

³⁰. C'est le produit scalaire du vecteur $|\psi\rangle$ par le vecteur $|\mathbf{a}_i\rangle$.

$$P(e) = P(a_i \vee a_j \vee a_k \vee \dots, \psi) = |\mathbb{P}_{ijk\dots}|\psi\rangle|^2 \quad (9)$$

Les deux premiers axiomes de Kolmogorov sont vérifiés ci-après. Soit E l'événement exhaustif (disjonction de tous les événements élémentaires), alors sa probabilité vaut 1 (du fait de la norme unité de $|\psi\rangle$).

$$P(E) = P(a_1 \vee a_2 \vee \dots \vee a_n) = ||\psi\rangle|^2 = \langle\psi|\psi\rangle = 1 \quad (10)$$

La probabilité de la disjonction de 2 événements est la somme des probabilités de chaque événement.

$$P(a_i \vee a_j, \psi) = |\mathbb{P}_{ij}|\psi\rangle|^2 = |c_i|^2 + |c_j|^2 = P(a_i, \psi) + P(a_j, \psi) \quad (11)$$

d'après le théorème de Pythagore³¹.

D'après les travaux de P. Destouches-Février et J.L. Destouches,

Des raisons sérieuses existent pour penser qu'en construisant une théorie des prévisions assez générale pour respecter l'axiomatique de la théorie classique des probabilités sur n'importe quelle gamme d'événements définis contextuellement, on aboutit à des mathématiques de forme ondulatoire.

Et effectivement, une des versions initiales de la Mécanique Quantique est la Mécanique Ondulatoire de Schrödinger, élaborée en 1926.

Le vecteur $|\psi\rangle$ est décomposable sur n'importe quelle base³² de l'espace \mathbf{H} . Ainsi, le vecteur $|\psi\rangle$ est doublement en retrait de l'actualité en ce sens qu'il ne fixe pas l'événement qui va se produire, mais il ne fixe pas non plus la gamme d'événements possibles.

$|\psi\rangle$ est l'invariant du système des transformations de coordonnées probabilistes entre toutes les situations expérimentales accessibles à la suite d'une préparation donnée.³³

$|\psi\rangle$ renvoie d'emblée à ce qui est commun à *toutes* les mesures de variables pouvant faire suite à une préparation donnée.

Le vecteur d'état répond en définitive à ce qu'on attendait d'un outil probabiliste adapté à la prédiction de faits définis contextuellement, comme ceux dont doit rendre compte la Mécanique Quantique. Il constitue une entité mathématique universelle et invariante apte à fournir des informations probabilistes sur les résultats de n'importe quelle expérience qui pourrait être effectuée dans le futur d'une préparation, et non pas sur une gamme pré-donnée d'événements.

31. $|\mathbb{P}_{ij}|\psi\rangle|^2$ est un vecteur dans le plan défini par $|\mathbf{a}_i\rangle$ et $|\mathbf{a}_j\rangle$. La figure 7 montre un tel vecteur, noté $|\psi\rangle$ sur la figure, et le théorème de Pythagore dit que la longueur du vecteur $|\psi\rangle$ vaut $|c_1|^2 + |c_2|^2$.

32. On peut prendre n'importe quel autre système d'axes, pourvu qu'il soit orthonormé.

33. Note personnelle : Le théorème de Noether peut-il s'appliquer ici?

2-2-3 Vecteurs d'état et interférences Des prédictions ayant la forme de figures d'interférence apparaissent dans le calcul de la probabilité du résultat de la mesure d'une variable, effectuée à partir

- des probabilités des résultats qu'aurait donnés la mesure d'une autre variable si elle avait été effectuée (calcul effectué en partant d'une formule de transformation – ou changement de base)³⁴,
- du vecteur d'état d'une préparation résultant de la composition de deux ou plusieurs préparations (calcul effectué en partant du principe de superposition).³⁵

La signification minimale du principe de superposition de la Mécanique Quantique est la suivante :

Si deux préparations sont caractérisées par les vecteurs d'état $|\psi_1\rangle$ et $|\psi_2\rangle$, il doit être toujours possible de mettre en œuvre une troisième préparation qui soit caractérisée par une superposition linéaire quelconque de ces deux vecteurs d'état :

$$|\psi\rangle = \lambda_1|\psi_1\rangle + \lambda_2|\psi_2\rangle.$$

L'exemple des fentes d'Young permet de mieux comprendre cette signification. $|\psi_1\rangle$ (resp. $|\psi_2\rangle$) est la préparation qui comprend la source et un cache percé de la seule fente A (resp.

34. Ayant deux variables A et B à calculer, le même vecteur d'état $|\psi\rangle$ se décompose dans deux bases différentes (décomposition spectrale de $|\psi\rangle$) :

$$\begin{aligned} |\psi\rangle &= \sum_{i=1}^n c_i |\mathbf{a}_i\rangle \text{ pour la variable } A \\ |\psi\rangle &= \sum_{i=1}^n q_i |\mathbf{b}_i\rangle \text{ pour la variable } B. \end{aligned} \quad (12)$$

Le changement de base s'écrit

$$|\mathbf{b}_p\rangle = \sum_{i=1}^n |\mathbf{a}_i\rangle \langle \mathbf{a}_i | \mathbf{b}_p \rangle. \quad (13)$$

En remplaçant cette équation dans (12), on trouve que

$$c_i = \sum_{p=1}^n q_p \langle \mathbf{a}_i | \mathbf{b}_p \rangle. \quad (14)$$

Avec les notations

$$\begin{aligned} P(a_i, \psi) &= |c_i|^2 \\ P(b_p, \psi) &= |q_p|^2 \\ P(a_i, b_p) &= |\langle \mathbf{a}_i | \mathbf{b}_p \rangle|^2, \end{aligned}$$

on a

$$P(a_i, \psi) = \sum_{p=1}^n P(b_p, \psi) P(a_i, b_p) + [\text{termes croisés}]. \quad (15)$$

Le calcul classique des probabilités donnerait la même équation sans les termes croisés.

35. Note personnelle : Toute préparation ne peut-elle se décomposer en deux préparations? (Inverse de l'unification des contextes).

B). Alors on peut mettre en œuvre une troisième préparation $|\psi\rangle = |\psi_1\rangle + |\psi_2\rangle$, qui est celle qui a un cache percé des *deux* fentes A et B. La probabilité de trouver un impact sur l'écran en x est³⁶

$$\begin{aligned}
 P(x,\psi) &= |\langle \mathbf{x} | \psi \rangle|^2 \\
 &= |\langle \mathbf{x} | \psi_1 \rangle + \langle \mathbf{x} | \psi_2 \rangle|^2 \\
 &= |\langle \mathbf{x} | \psi_1 \rangle|^2 + |\langle \mathbf{x} | \psi_2 \rangle|^2 + \langle \psi_1 | \mathbf{x} \rangle \langle \mathbf{x} | \psi_2 \rangle + \langle \psi_2 | \mathbf{x} \rangle \langle \mathbf{x} | \psi_1 \rangle \\
 &= P(x,\psi_1) + P(x,\psi_2) + [\text{termes croisés}].
 \end{aligned} \tag{16}$$

Une théorie probabiliste portant sur des événements dont la définition est contextuelle conduit dans certaines conditions à des prédictions de forme ondulatoire : les phénomènes d'interférence,

représentés par les termes croisés de l'équation (16). Comme on l'a dit auparavant, l'équation classique des probabilités conditionnelles, équ. (7), ne s'applique pas ici.

2-2-4 Vecteurs d'état et nombres complexes Il y a deux façons d'expliquer pourquoi les nombres complexes et l'espace de Hilbert sont indispensables en Mécanique Quantique :

- l'explication *a posteriori* dit que la plupart des phénomènes ne peuvent pas s'expliquer si on n'utilise pas les nombres complexes,
- l'explication *a priori* s'appuie sur des considérations à propos de l'adaptation mutuelle de plusieurs niveaux de symétries^{37 38}.

2-3 Évoluer

2-3-1 Représentation de Schrödinger et représentation de Heisenberg Il y a plusieurs stratégies pour définir la préparation d'une expérience, comme le montre la figure 8. La stratégie qui offre le plus de souplesse (et celle habituellement employée) est la stratégie (2). Elle consiste à définir la préparation comme étant tout ce qui précède le filtre. L'avantage est de faciliter la détermination du vecteur d'état à la sortie du filtre. *Si* une mesure de la variable A était effectuée juste à la sortie du filtre, elle *donnerait* telle valeur de sa gamme de possibles avec probabilité 1.

L'évolution est ce qui se passe entre la sortie du filtre et la mesure proprement dite. On a le choix entre faire porter l'évolution sur le vecteur d'état (représentation de Schrödinger) ou sur le système d'axes (représentation de Heisenberg).

36. Rappelons que $\langle \mathbf{x} | \psi \rangle$ est un nombre complexe et $\langle \psi | \mathbf{x} \rangle$ est son conjugué complexe : $\langle \psi | \mathbf{x} \rangle = \langle \mathbf{x} | \psi \rangle^*$. Voir l'annexe B sur les nombres complexes.

37. Note personnelle : L'espace \mathbf{H} a 2 dimensions et non 6 (une par valeur de spin par direction d'espace) car les observables des composantes du spin dans chaque direction d'espace (S_x, S_y et S_z) ne commutent pas et sont donc représentées dans un même espace à 2 dimensions (chaque composante ayant deux valeurs possibles). Voir note 29.

38. Les mesures de spin s'effectuant dans l'espace réel à 3 dimensions, la variable de spin possède 3 composantes spatiales. L'espace \mathbf{H} ne peut pas se contenter de deux dimensions réelles, il faut que ses axes soient complexes. C'est la relation entre le groupe des rotations spatiales $O(3)$ et le groupe $SU(2)$ des transformations dans un espace unitaire de dimension 2.

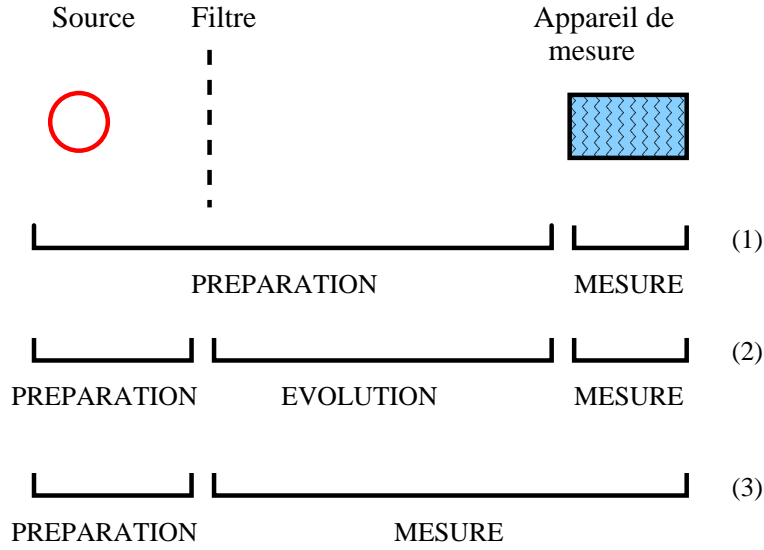


FIG. 8 – Les différentes possibilités du schéma préparation - (évolution) - mesure.

2-3-2 L'équation de Schrödinger Dans la représentation de Schrödinger, c'est le vecteur d'état qui dépend du temps. Soient deux instants t_0 et t , avec t postérieur à t_0 . L'opérateur $U(t, t_0)$ transforme le vecteur d'état $|\psi(t_0)\rangle$ caractérisant la préparation (2) de la Fig. 8 en un autre vecteur d'état $|\psi(t)\rangle$:

$$|\psi(t)\rangle = U(t, t_0)|\psi(t_0)\rangle. \quad (17)$$

On obtient ainsi trois conditions sur l'opérateur U :

- il transforme un vecteur de l'espace de Hilbert en un autre vecteur du *même* espace de Hilbert,
- les normes des vecteurs $|\psi(t_0)\rangle$ et $|\psi(t)\rangle$ doivent être égales U est une transformation qui conserve la norme ; c'est une transformation *unitaire*,
- Si t_1 est un temps postérieur à t , alors $U(t_1, t)U(t, t_0) = U(t_1, t_0)$. Cette égalité³⁹ implique que

$$U(t, t_0) = e^{-iH(t-t_0)}, \quad (19)$$

où H est un opérateur hermitique⁴⁰ unique (C'est le hamiltonien du système physique dont les valeurs propres réelles sont les énergies possibles du système).

³⁹. Démonstration : $|\psi(t_1)\rangle$ peut être vu comme évoluant à partir de l'état à l'instant t ou de celui à l'instant t_0 . Ce qui donne :

$$\begin{aligned} |\psi(t_1)\rangle &= U(t_1, t)|\psi(t)\rangle = U(t_1, t)U(t, t_0)|\psi(t_0)\rangle \\ |\psi(t_1)\rangle &= U(t_1, t_0)|\psi(t_0)\rangle \end{aligned} \quad (18)$$

⁴⁰. Les caractéristiques des opérateurs hermitiques sont les suivantes [5, p. 136] :

- ils ont des valeurs propres réelles ;
- les vecteurs propres associés aux valeurs propres sont tous orthogonaux entre eux.

De ces considérations, on obtient l'équation de Schrödinger qui décrit la variation du vecteur d'état par unité de temps en fonction du hamiltonien :

$$i \frac{\partial |\psi(t)\rangle}{\partial t} = H |\psi(t)\rangle. \quad (20)$$

2-4 Mesurer

2-4-1 Conjonctions, corrélations et "non-séparabilité" Bitbol propose les définitions suivantes :

- **Définition :** Une préparation est dite "singulière" si la mesure de l'observable nombre effectuée à sa suite donne la valeur 1,
- **Définition :** Une préparation est dite "binaire" si la mesure de l'observable nombre effectuée à sa suite donne la valeur 2.

Ces définitions nous évitent d'employer un vocabulaire d'objets qui dirait que la source a émis une ou deux particules.

Pour deux expériences complètement disjointes (préparations et mesures séparées), on aura deux vecteurs d'états $|\psi_{\mathbf{A}}\rangle$ et $|\psi_{\mathbf{B}}\rangle$ dans deux espaces de Hilbert $\mathbf{H}_{\mathbf{A}}$ et $\mathbf{H}_{\mathbf{B}}$.⁴¹ Supposons maintenant que l'on fasse deux expériences à partir d'une même préparation⁴², alors on a un seul vecteur d'état $|\psi\rangle$ commun. Par ailleurs, ayant deux gammes de possibles distinctes, on a deux espaces de Hilbert $\mathbf{H}_{\mathbf{A}}$ et $\mathbf{H}_{\mathbf{B}}$. À chacun des $n_{\mathbf{A}}$ axes orthogonaux de l'espace $\mathbf{H}_{\mathbf{A}}$ s'ajoutent les $n_{\mathbf{B}}$ axes orthogonaux de l'espace $\mathbf{H}_{\mathbf{B}}$ pour former un nouvel espace dans lequel se trouve le vecteur $|\psi\rangle$. Ce nouvel espace possède $n_{\mathbf{A}} \times n_{\mathbf{B}}$ dimensions ; il est le *produit tensoriel* de $\mathbf{H}_{\mathbf{A}}$ et $\mathbf{H}_{\mathbf{B}}$ et se note

$$\mathbf{H}_{\mathbf{A}} \otimes \mathbf{H}_{\mathbf{B}}. \quad (21)$$

Les vecteurs de base de $\mathbf{H}_{\mathbf{A}}$ (resp. $\mathbf{H}_{\mathbf{B}}$) étant $|\mathbf{a}_i\rangle$ (resp. $|\mathbf{b}_j\rangle$), les vecteurs de base de $\mathbf{H}_{\mathbf{A}} \otimes \mathbf{H}_{\mathbf{B}}$ sont notés $|\mathbf{a}_i \mathbf{b}_j\rangle$. On les note aussi $|\mathbf{a}_i\rangle \otimes |\mathbf{b}_j\rangle$ ou encore simplement $|\mathbf{a}_i\rangle |\mathbf{b}_j\rangle$. Cette famille de vecteurs $|\mathbf{a}_i \mathbf{b}_j\rangle$

est l'instrument requis pour représenter les résultats de la mesure de deux variables dans un seul espace et pour évaluer conjointement leur probabilité au moyen d'un seul vecteur d'état.

Le vecteur $|\psi\rangle$ se décompose sur la base $|\mathbf{a}_i \mathbf{b}_j\rangle$:

$$|\psi\rangle = \sum_{i=1}^{n_{\mathbf{A}}} \sum_{j=1}^{n_{\mathbf{B}}} c_{ij} |\mathbf{a}_i \mathbf{b}_j\rangle. \quad (22)$$

La probabilité conjointe d'obtenir a_i lors de la mesure de la variable A et b_j lors de la mesure de la variable B est

$$P(a_i \text{ et } b_j, \psi) = |c_{ij}|^2 = |\langle \mathbf{a}_i \mathbf{b}_j | \psi \rangle|^2. \quad (23)$$

41. Note personnelle : Voir si l'expérience EPR doit être décrite de cette façon. Est-ce l'interprétation proposée par Adenier [1]? En ce qui concerne Adenier, voir le § 4-5.

42. Ce peut être le cas de la mesure de deux variables distinctes, compatibles, et non redondantes effectuée à la suite d'une préparation singulière ou bien le cas de la mesure de deux variables quelconques – chacune effectuée dans une sous-région où la mesure de l'observable nombre donne 1 – effectuée à la suite d'une préparation binaire.

Avec la théorie classique des probabilités, pour savoir si les variables A et B sont corrélées, il suffit de voir si la probabilité conjointe s'écrit comme le produit des probabilités individuelles ou non. Si

$$P(a_i \text{ et } b_j) = P(a_i).P(b_j), \quad (24)$$

alors les événements sont indépendants. Au contraire, si

$$P(a_i \text{ et } b_j) = P(a_i).P(b_j \text{ si } a_i), \quad (25)$$

les événements sont corrélés, puisque la formule fait intervenir la probabilité conditionnelle $P(b_j \text{ si } a_i)$ qui est la probabilité d'obtenir b_j à la condition d'avoir obtenu a_i .

Dans le cas du formalisme de la Mécanique Quantique, les variables ne sont pas corrélées si on peut écrire

$$|\psi\rangle = |\psi_{\mathbf{A}}\rangle \otimes |\psi_{\mathbf{B}}\rangle. \quad (26)$$

Effectivement, on a alors

$$\begin{aligned} P(a_i \text{ et } b_j, \psi) &= |\langle \mathbf{a}_i \mathbf{b}_j | \psi \rangle|^2 \\ &= |\langle \mathbf{a}_i | \psi_{\mathbf{A}} \rangle \langle \mathbf{b}_j | \psi_{\mathbf{B}} \rangle|^2 = |\langle \mathbf{a}_i | \psi_{\mathbf{A}} \rangle|^2 \cdot |\langle \mathbf{b}_j | \psi_{\mathbf{B}} \rangle|^2 \\ &= P(a_i, \psi_{\mathbf{A}}) \cdot P(b_j, \psi_{\mathbf{B}}). \end{aligned} \quad (27)$$

Dans le cas où les variables sont corrélées, c'est un peu plus compliqué.

Définition : Le vecteur d'état relatif est l'équivalent de la probabilité conditionnelle dans un formalisme adapté à des événements définis contextuellement.

Le vecteur d'état relatif de $|\mathbf{a}_i\rangle$ est noté $|\phi_{\mathbf{a}_i}\rangle$ et permet de mettre l'équ. (22) sous la forme⁴³

$$|\psi\rangle = \sum_{i=1}^{n_A} d_i |\mathbf{a}_i\rangle \otimes |\phi_{\mathbf{a}_i}\rangle. \quad (28)$$

Recommençons le calcul de la probabilité d'obtenir conjointement a_i et b_j .

$$\begin{aligned} P(a_i \text{ et } b_j, \psi) &= |\langle \mathbf{a}_i \mathbf{b}_j | \psi \rangle|^2 \\ &= \left| \sum_{i'} d_{i'} \langle \mathbf{a}_i | \mathbf{a}_{i'} \rangle \langle \mathbf{b}_j | \phi_{\mathbf{a}_{i'}} \rangle \right|^2 \\ &= |d_i|^2 \cdot |\langle \mathbf{b}_j | \phi_{\mathbf{a}_i} \rangle|^2 \end{aligned} \quad (29)$$

Dans cette formule, $|d_i|^2$ est la probabilité que la variable A prenne la valeur a_i à la suite de la préparation représentée par le vecteur d'état $|\psi\rangle$; $|\langle \mathbf{b}_j | \phi_{\mathbf{a}_i} \rangle|^2$ équivaut à la probabilité conditionnelle d'obtenir la valeur b_j pour la mesure de B , si une mesure non destructive de A était effectuée conjointement et donnait le résultat a_i .

Un exemple fameux de corrélation est donné par le paradoxe EPR (Einstein, Podolsky, Rosen) qui montre la non-séparabilité des systèmes quantiques. L'expérience EPR consiste à préparer deux photons (émis par désexcitation d'atomes de Calcium) ayant des polarisations opposées. Ces deux photons sont "enchevêtrés", c.-à-d. que l'état formé par l'ensemble

43. Remarquons que $|\phi_{\mathbf{a}_i}\rangle = \frac{1}{d_i} \sum_{j=1}^{n_B} c_{ij} |\mathbf{b}_j\rangle$. C'est donc un vecteur de l'espace \mathbf{H}_B .

des deux photons est connu : il est de polarisation nulle. Connaissant l'état de l'ensemble formé par les deux photons, la mesure de l'état de polarisation de l'un des photons entraîne la connaissance immédiate de l'état de polarisation de l'autre photon. C'est ce qu'on appelle la non-séparabilité des systèmes quantiques. Jusqu'ici, il n'y a pas de paradoxe ; celui-ci apparaît lorsqu'il est question de la mesure de deux variables incompatibles, mais cela sera décrit au § 3-2-2.

La non-séparabilité se traduit par une sorte de corrélation issue d'une sorte de cause commune : la préparation.

La non-séparabilité quantique apparaît ainsi comme une forme affaiblie de corrélation, dont rend compte une version contextuelle, non génératrice d'inégalités de Bell^{44 45}, du concept de causes communes⁴⁶.

2-4-2 Observables incompatibles et règles de quantification **Définition :** *Des variables sont incompatibles si la conjonction des contextes expérimentaux n'est pas possible.* Si A et B sont deux variables incompatibles, et une certaine valeur est obtenue avec certitude pour A (sa probabilité est 1), alors il ne peut y avoir aucune valeur de B qui soit obtenue avec certitude.

Pour qu'à la suite d'une préparation donnée les probabilités des valeurs de deux variables incompatibles ne soient pas en général *simultanément* égales à 1, il suffit que les valeurs de ces variables soient représentées dans le *même* espace de Hilbert \mathbf{H} par des axes pour la plupart *inclinés* l'un par rapport à l'autre⁴⁷ (voir la Fig. 9).

À la variable A pouvant prendre les valeurs a_j , on associe l'opérateur (*l'observable*)

$$A = \sum_j a_j \mathbb{P}_j. \quad (30)$$

\mathbb{P}_j étant l'opérateur de projection sur l'axe $|\mathbf{a}_j\rangle$. On a aussitôt les relations suivantes :

$$\begin{aligned} \mathbb{P}_j |\mathbf{a}_j\rangle &= |\mathbf{a}_j\rangle \\ \mathbb{P}_i |\mathbf{a}_j\rangle &= 0 \text{ si } i \neq j \\ A |\mathbf{a}_j\rangle &= a_j |\mathbf{a}_j\rangle. \end{aligned} \quad (31)$$

Définition : *L'équation (31) est l'équation aux valeurs propres. Les vecteurs $|\mathbf{a}_j\rangle$ sont les vecteurs propres et les valeurs a_j sont les valeurs propres de l'observable A .*

Mathématiquement, deux observables sont incompatibles lorsqu'elles n'ont pas tous leurs vecteurs propres en commun.

Théorème : Deux observables incompatibles ne commutent pas entre elles. C'est-à-dire

$$AB \neq BA. \quad (32)$$

44. Les inégalités de Bell sont reliées à la non-séparabilité de la Mécanique Quantique et sont censées montrer qu'aucune théorie dite locale, c.-à-d. pour laquelle l'interaction entre les objets est ponctuelle, ne peut expliquer ces corrélations. On reviendra sur ces inégalités de Bell au § 4-5.

45. Note personnelle : Comprendre en quoi elle est non génératrice d'inégalités de Bell

46. Note personnelle : Est-ce que ça va dans le sens d'Adenier ?

47. Supposons que $|\psi\rangle = |\mathbf{a}_1\rangle$, c'est-à-dire que le système est préparé de façon à obtenir a_1 avec certitude lors de la mesure de A . Alors, la probabilité d'obtenir b_1 lors de la mesure de B est donnée par $|\langle \mathbf{a}_1 | \mathbf{b}_1 \rangle|^2$ qui ne vaut 1 que si $|\mathbf{b}_1\rangle = \pm |\mathbf{a}_1\rangle$.

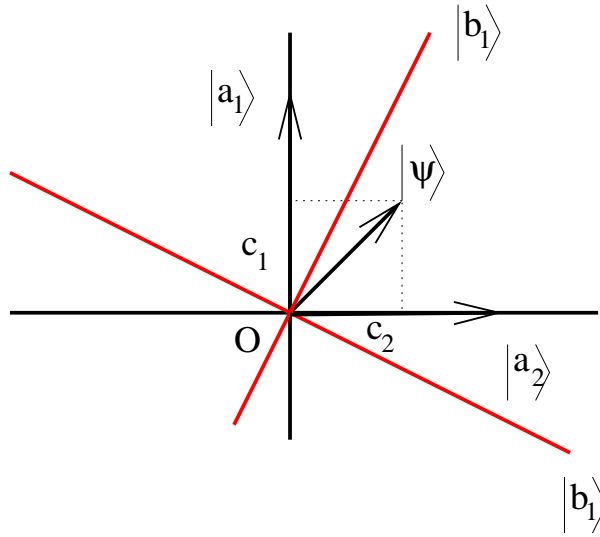


FIG. 9 – Représentation de deux variables incompatibles A et B .

Ce théorème est une des caractéristiques fondamentales de la Mécanique Quantique. En mécanique classique, toutes les observables commutent. Parmi les relations de commutation les plus connues, on a la suivante pour l'observable position et l'observable quantité de mouvement⁴⁸ :

$$PX - XP = -i\hbar/2\pi, \quad (33)$$

où \hbar est la constante de Planck. Ces relations de commutation permettent de montrer la fameuse relation d'incertitude de Heisenberg.

De plus, la non-commutativité des observables, associée à certaines conditions aux limites, conduit à la *quantification* des valeurs de ces observables.

2-4-3 La réduction du vecteur d'état La mesure *consécutif* de deux variables incompatibles peut être faite avec une précision arbitrairement bonne pour chacune des variables prise isolément. La figure 10 en montre le dispositif. La probabilité d'obtenir b_j après a_i est donnée par

$$P(b_j \text{ après } a_i, \psi) = |\langle \mathbf{b}_j | \mathbf{a}_i \rangle|^2 \cdot |\langle \mathbf{a}_i | \psi \rangle|^2 = P(b_j, a_i) \cdot P(a_i, \psi). \quad (34)$$

La probabilité *a priori* du résultat b_j après une mesure intermédiaire non destructive de la variable A quel que soit le résultat de cette dernière, se déduit de la précédente en faisant la somme des probabilités correspondant à chaque résultat possible de la mesure de A :

$$P(b_j \text{ après } A, \psi) = \sum_i |\langle \mathbf{b}_j | \mathbf{a}_i \rangle|^2 \cdot |\langle \mathbf{a}_i | \psi \rangle|^2. \quad (35)$$

L'interprétation des physiciens fait intervenir la notion de *réduction de l'état* ou *réduction du paquet d'onde*. Suite à une préparation du système physique dans l'état $|\psi\rangle$, il évolue jusqu'à l'appareil de mesure de A , à la sortie duquel le système se retrouve brusquement

48. La quantité de mouvement est en général donnée par le produit de la masse par la vitesse.

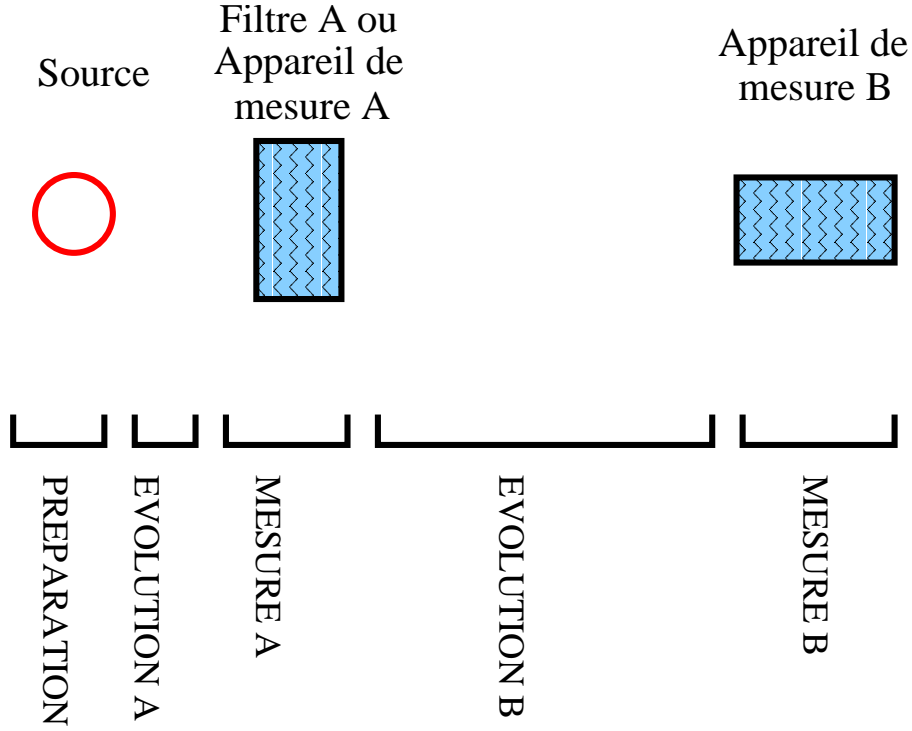


FIG. 10 – *Découpage d'une expérience comportant des mesures séquentielles*

dans un des états propre de A , disons $|\mathbf{a}_i\rangle$. La probabilité d'obtenir b_j à la sortie de l'appareil de mesure de B ne dépend plus que de $|\mathbf{a}_i\rangle$, et non plus de $|\psi\rangle$. Cette probabilité est $|\langle \mathbf{b}_j | \mathbf{a}_i \rangle|^2$. L'état du système a donc changé brutalement à la suite de la mesure de A , il a sauté de l'état $|\psi\rangle$ à l'état $|\mathbf{a}_i\rangle$. On dit que l'état du système a été réduit. Dans cette description, il y a deux modes d'évolution du système :

- l'évolution entre deux mesures, qui est décrite par l'équation de Schrödinger (20), qui est déterministe et continue,
- et l'évolution lors d'une mesure, qui est stochastique et discontinue.

Ce paradoxe majeur de la Mécanique Quantique repose sur une subtile confusion, qui mélange la première partie du découpage de la figure 10 avec le découpage (2) de la figure 8, ce qui revient à remplacer l'équation (35) par l'équ. (34). L'équation (35) n'est pas le calcul de la probabilité d'obtenir directement b_j sans mesure de A . En effet, cette dernière probabilité contient des termes d'interférences qui n'existent pas dans l'équ. (35). Calculons cette probabilité.

$$\begin{aligned}
 P(b_j, \psi) &= |\langle \mathbf{b}_j | \psi \rangle|^2 = \left| \sum_i \langle \mathbf{b}_j | \mathbf{a}_i \rangle \langle \mathbf{a}_i | \psi \rangle \right|^2 \\
 &= P(b_j \text{ après } A, \psi) + [\text{termes croisés}].
 \end{aligned}
 \tag{36}$$

Les termes croisés, dits termes d'interférence, proviennent du fait que des événements sont définis relativement à un contexte expérimental qui n'est pas en place. La mesure de A n'est que contrafactuelle.

Le problème principal, soulevé par la prise en compte des mesures séquentielles dans le formalisme prédictif de la Mécanique Quantique, n'est pas celui de

la “réduction de l’état” proprement dit, mais celui de la disparition des effets d’interférence.

Cette “explication” paraît peu physique. En fait, toute théorie prédictive visant à expliquer les termes d’interférence, doit avoir dans ses pré-conditions le concept d’événements expérimentaux mutuellement exclusifs. Or, ce simple concept conduit aux termes d’interférence. La théorie ne peut pas expliquer ce sur quoi elle se base.

2-4-4 La "réduction du paquet d'onde" dans l'histoire Au cours de l’histoire, la réduction de l’état est tantôt considéré comme un phénomène objectif, tantôt comme un phénomène subjectif, et tantôt comme une combinaison des deux.

Pour les objectivistes, la fonction d’onde $|\psi\rangle$ représente une onde “réelle”. On a tenté d’expliquer son changement d’état brutal en ajoutant à l’équation de Schrödinger, continue et déterministe, un terme d’évolution discontinue et stochastique, très petit pour chaque particule, mais cumulatif pour un grand nombre de particules (système macroscopique). Cette approche a reçu des critiques très pertinentes.

Pour les subjectivistes, selon l’interprétation probabiliste de Born, la fonction d’onde ψ ne représente pas le système physique ni l’un de ses attributs physiques mais seulement notre *connaissance* concernant ces derniers. S’il en est ainsi, la réduction du paquet d’ondes ne signale plus l’effondrement soudain d’une onde répandue dans tout l’espace ou le changement brutal de l’état du système; elle constitue simplement un procédé permettant de prendre en compte l’accroissement de notre *connaissance* de l’état du système à la suite d’une expérience. Mais à cause de la perte des interférences lorsqu’un appareil de mesure intermédiaire est utilisé, l’effondrement de la fonction d’onde représentait tout de même un changement réel de l’état de l’électron. Car un accroissement de nos connaissances ne peut pas expliquer cette perte des effets d’interférence.

Il faut distinguer formellement deux étapes dans un processus de mesure :

- celle de l’objectivation d’une gamme de possibles,
- et celle de la sélection d’un élément de cette gamme.

Parallèlement, il faut distinguer deux phases dans le passage des estimations probabilistes issues de la préparation à celles qui tiennent compte d’un certain résultat de mesure intermédiaire :

- la disparition des termes d’interférence dans la formule donnant la probabilité d’une disjonction de valeurs d’observable,
- l’indication de l’un des résultats expérimentaux possibles comme celui qui a été effectivement obtenu.

Dès lors qu’il n’y a plus de termes d’interférence, on peut parler d’événement “objectivement survenus”, car on travaille dans une seule gamme de possibles : les probabilités classiques rendent alors compte de notre ignorance sur l’événement survenu.

2-5 Contexte et unité conceptuelle Une dénomination plus appropriée que “Mécanique Quantique” est proposée par Bitbol : celle de *formalisme prédictif contextuel*.

3- Ce qui reste des images du monde Le physicien utilise souvent un langage imagé pour appuyer les formules mathématiques. Voyons comment ceci est remis en cause.

3-1 L’image et l’objet

3-1-1 Quatre orientations sur les images Il y a quatre sortes d'attitude vis-à-vis de la valeur des images :

1. la mise à l'écart persistante des images au profit du formalisme mathématique,
2. une dénonciation nuancée des limitations de nos formes d'intuition (critique contre l'unité de l'image classique du monde),
3. la mise en œuvre effective de cette multiplicité d'images des processus physiques, quitte à atténuer leur portée en les qualifiant de seulement analogiques, métaphoriques, ou symboliques,
4. l'accréditation d'une méta-image (inséparabilité de l'objet et de l'appareil de mesure).

3-1-3 Une méta-image : l'interaction entre appareil et objet Kant définit l'objet en tant que phénomène comme "ce qui est posé devant la connaissance". D'un autre côté, l'objet en tant que chose-en-soi a le pouvoir d'affecter notre esprit ou nos sens. Le lien entre ces deux fonctions de l'objet est le suivant : L'objet ne peut se comprendre comme ce à quoi se rapporte notre connaissance que s'il nous est par ailleurs donné à travers la réceptivité sensible. Cette thèse est celle qui a influencé les raisonnements de Bohr et Heisenberg dans les années 1920-1930. Pourtant, il y a une seconde thèse possible : retenir exclusivement la teneur intentionnelle de l'objet, et ne plus réserver à la chose-en-soi que le rôle d'un concept limitatif qui restreint les prétentions de la sensibilité.

3-2-1 Le phénomène et la perturbation De tous les créateurs de la Mécanique Quantique, Bohr est celui qui a le mieux saisi la nouveauté de cette théorie à sa source : l'élargissement des règles prédictives à des faits expérimentaux définis relativement à un contexte.

3-2-2 Le phénomène et sa définition holistique Rappel sur le paradoxe EPR :

1. Il est possible préparer un système composé de deux sous-systèmes corrélés (notés 1 et 2) de telle sorte qu'on puisse prédire avec certitude la valeur de deux variables : la distance séparant les deux sous-systèmes ($q = q_1 - q_2$) et la somme des quantités de mouvement des deux sous-systèmes ($p = p_1 + p_2$).
2. La mesure de la position q_1 du sous-système 1 permet de prédire avec *certitude* le résultat q_2 que donnerait une mesure de la position de 2 : $q_2 = q_1 - q$.
3. Le sous-système 2 ne subit aucune perturbation pendant la mesure précédente puisque celle-ci est effectuée sur le sous-système 1.
4. On peut donc faire une mesure directe de la quantité de mouvement de 2. On aura alors *à la fois* une valeur précise de la quantité de mouvement *et* une valeur précise de la position de 2.
5. Or la Mécanique Quantique ne permet *jamais* d'indiquer simultanément les valeurs exactes prises par les deux variables conjuguées sur un système.

Einstein, Podolsky et Rosen en concluent que la Mécanique Quantique est une théorie incomplète.

Pour des raisons de causalité, l'idée d'une perturbation à distance instantanée produite sur le sous-système 2 par la mesure faite par le sous-système 1 ne peut pas être retenue.

Bohr répond une première fois en disant que

- la définition même des quantités physiques inclut la procédure de mesure,
- les conditions expérimentales sont un élément inhérent au phénomène,

- ces éléments de définition ou d'inhérence ne dépendent pas de l'interaction mécanique directe du système et de l'appareillage.

La détermination précise de la variable position sur 1 suppose la mise en œuvre d'un dispositif expérimental incompatible avec celui qui aurait été nécessaire pour déterminer précisément la quantité de mouvement du même sous-système 1. Une fois la mesure de la position de 1 effectuée, seule la position de 2 peut être prédite. Au contraire, la quantité de mouvement de 2, qui *aurait pu* être prédite à partir de la quantité de mouvement de 1, ne peut plus l'être, puisque cette dernière ne peut plus être mesurée avec précision. La mesure effectuée sur 1 modifie les conditions mêmes qui définissent les types de prédictions possibles portant sur 2. Le formalisme de la Mécanique Quantique ne permet jamais de *prédire* avec certitude la valeur exacte de deux variables conjuguées pour un système.

3-2-3 L'objet et l'observation Le concept d'observation exige la distinction entre l'objet et les instruments de son investigation. Mais qu'est-ce qui permet d'affirmer que ce que l'on effectue en physique microscopique ce sont essentiellement des "observations" ?

En physique microscopique, comme dans bien d'autres sciences, on "expérimente". Ce n'est donc pas se tenir devant un objet (observer), mais plutôt se faire acteur dans une situation.

3-3 Heisenberg, les relations d'"incertitude", et les expériences de pensée

3-3-1 Précision ou prévision ? La plupart des relations de Heisenberg sont des conséquences indirectes de la contextualité des déterminations et de l'incompatibilité des contextes⁴⁹. La forme la plus générale de ces relations fait intervenir le commutateur $[A,B] = AB - BA$ de deux observables [5], comme on le disait après l'équ. (33) :

$$\Delta A \cdot \Delta B \geq \frac{1}{2} |\langle [A,B] \rangle|, \quad (37)$$

où $|\cdot|$ désigne la valeur absolue et $\langle \cdot \rangle$ désigne la valeur moyenne.

L'interprétation minimale des relations de Heisenberg est la suivante :

Soit une série de préparations expérimentales identiques. Les unes sont suivies d'une mesure de l'observable A et les autres d'une mesure de l'observable B . Dans ce cas, le produit de la dispersion sur la mesure de A par la dispersion sur la mesure de B doit être supérieur ou égal à la moitié de la valeur moyenne du commutateur de ces deux observables.

L'interprétation courante (et celle de Heisenberg lui-même) est que ces relations imposent une limitation réciproque de la précision avec laquelle on peut déterminer la valeur de deux variables conjuguées. Or, l'interprétation minimale ci-dessus ne fixe à aucun moment une borne inférieure à la précision des mesures.⁵⁰

49. sauf la relation liant l'énergie et le temps : $\Delta E \Delta t \geq h/4\pi$.

50. Note personnelle : C'est important, car c'est souvent mal compris. Prenons un exemple. Soit une préparation caractérisée par la valeur de l'observable nombre égale à 1, une mesure non destructive de l'observable P est suivie d'une mesure de l'observable conjuguée Q . La précision que l'on peut obtenir lors de la mesure de Q n'est en aucun cas limitée par la précision obtenue pour la mesure de P . Par contre, la *prévision* de la valeur (et non pas la valeur elle-même) de Q est rendue "imprécise" par la grande précision de la mesure antérieure de P . Heisenberg écrit :

"The more precisely the POSITION is determined, the less precisely the MOMENTUM is

Le second sens selon lequel on peut parler de limitation réciproque de la précision est dans le cas d'une mesure précise de P suivie d'une mesure également précise de Q avant de remesurer P . La gamme de dispersion attendue pour cette nouvelle mesure de P s'est considérablement accrue par rapport à ce qu'elle était immédiatement après la première mesure de P .

L'acquis prédictif de la mesure initialement précise de P a donc été complètement dilapidé par la mesure précise intermédiaire de Q .

4- Objets anciens et théorie nouvelle : le prix du conservatisme ontologique

4-1-1 Catégories et expérience Alors que dans les débuts, Wittgenstein aurait facilement accepté l'idée d'un pur langage de phénomènes, il change de conception à partir de 1929 : "la description des phénomènes au moyen de l'hypothèse d'un monde de corps matériels est indispensable par sa simplicité, lorsqu'on la compare à la description phénoménologique incompréhensiblement compliquée".

Les difficultés rencontrés par le phénoménisme viennent du fait que le langage utilisé est toujours un langage d'objets. Le phénoménisme peut difficilement utiliser des éléments indicibles basé sur une expérience pré-verbale.

Il faut donc revenir sur la structure élémentaire du langage. Les besoins des sciences ont conduit à rechercher un soubassement idéal et universel commun à toutes les structures linguistiques particulières.

Le projet d'Husserl a été d'unir dans la seule discipline de la logique formelle les deux catégories dans lesquelles doivent se couler tout discours scientifique. Ces catégories sont

- celle de la signification qui comprend les concepts de proposition, concept, vérité... et qui se rattache à la logique,
- celle d'objets qui comprend les concepts d'objet, d'unité, de nombre, de relation... et qui se rattache à la théorie des ensembles.

Pour sa part, Bitbol préfère conserver la séparation des deux groupes que forment la logique et la théorie des ensembles.

4-1-3 Prédicats et substrats La reproductibilité joue un rôle essentiel dans la reconnaissance de l'objet. Elle permet de stabiliser des prédicats qui peuvent servir à déterminer un objet. C'est ce que Bitbol entend par *la stabilisation du substrat de la prédication*. Celle-ci se traite en trois étapes :

- l'individualité d'un objet,
- son identité dans le temps,
- et sa capacité à servir d'unité dans un dénombrement.

Pour individualiser un objet, il faut disposer d'une ou plusieurs déterminations qui n'appartiennent qu'à lui seul. Mais si l'on prend cela comme définition de l'individualité, on se heurte au problème de l'indiscernabilité. Comment en effet différencier des objets ayant les mêmes déterminations? On a alors des classes d'objets indiscernables qualitativement identiques mais numériquement distincts.

En physique classique, le problème est résolu par l'existence d'un moyen externe de discerner les différents objets, c'est leur position. Cependant, tous les paradoxes ne sont

known".

pas résolus pour autant : Si les objets sont identiques, ils peuvent être échangés entre eux sans rien changer à l'ensemble formé de ces objets. Ils sont invariants par permutation spatiale. La physique classique de Newton (s'opposant ici à Leibniz) a choisi de traiter des objets permutable, en faisant la différence entre deux permutations possibles.

Définition : *les points matériels forment des classes d'objets qui ont une masse et une charge identique, qui n'ont aucune qualité ni forme spatiale distinctive, mais qui sont individualisés par leur position à un instant donné ; il s'agit d'objets indiscernables, mais que leurs positions distinctes empêchent de confondre.*

C'est Boltzmann qui a résolu le paradoxe de l'impermutabilité en ayant recours à l'identité du point matériel à travers le temps. Et cela a une importance considérable pour la physique statistique, notamment dans le dénombrement des états microscopiques qui correspondent à un même état macroscopique.

Ayant réussi à identifier des objets, on peut maintenant les dénombrer en se servant d'un objet comme d'une unité. On aboutit alors à la théorie des ensembles et de l'arithmétique.

4-2 De la chose à l'objet de la physique quantique En physique quantique comme en physique classique, les instruments de mesures utilisés ont un projet de fonctionnement classique, c.-à-d. qu'ils attendent des déterminations des objets plus ou moins localisés dans l'espace ordinaire. La preuve est que les physiciens actuels parlent encore de "propriétés des particules élémentaires". La différence du cas quantique par rapport au cas classique est que

la suite des résultats expérimentaux, et la structure théorique qui en fixe le cadre prédictif, ne permettent pas de satisfaire à certains critères de reproductibilité, d'individualité, et de réidentifiabilité spatio-temporelle, qui rendraient immédiatement légitimes la prédication et la dénomination d'objets dans l'espace ordinaire.

4-2-2 La mise à l'épreuve de la prédication et de la dénomination Lorsque deux variables conjuguées (la position et la quantité de mouvement par ex.) sont mesurées alternativement, la reproductibilité de la valeur de chacune des variables n'est plus réalisée. Si on veut laisser intact le concept de propriété malgré cette non-reproductibilité, on dit habituellement que la mesure de la seconde variable a été *perturbée* par la mesure de la première.

Une autre conséquence de l'incompatibilité des variables conjuguées est la perte de la "loi de continuité" de Boltzmann qui définissait un point matériel grâce à la continuité de sa trajectoire dans le temps et dans l'espace. En physique classique, même si tous les points n'étaient pas effectivement mesurés, rien n'empêchait qu'ils le fût en améliorant la précision des mesures. En physique quantique, à cause des relations d'incertitude de Heisenberg, plus les positions spatiales sont déterminées par des mesures proches dans le temps, plus leurs valeurs seront dispersées dans l'espace.

Cette impossibilité de réidentifier par continuité spatio-temporelle se répercute sur les règles du dénombrement. C'est ce qui se passe pour la thermodynamique statistique. Les particules quantiques sont impermutables : on ne peut plus différencier (*i.e.* compter) les permutations possibles des particules. Les particules n'obéissent plus à la statistique classique (voir l'annexe D) de Maxwell-Boltzmann, mais à celle de Bose-Einstein (pour

les bosons) ou à celle de Fermi-Dirac⁵¹ (pour les fermions). La physique quantique a perdu la reproductibilité des phénomènes et la réidentifiabilité spatio-temporelle qu'avait la physique classique.

4-2-3 La multiplicité des options ontologiques disponibles Plusieurs réponses à cette situation sont possibles :

1. la réponse instrumentaliste : Refuser de parler d'objets de l'expérimentation,
2. la réponse des physiciens : Continuer de parler d'objets ayant des propriétés, mais ajouter des restrictions et correctifs,
3. modifier la structure catégoriale de la langue : Recourir à une logique non classique et modifier certains axiomes de la théorie des ensembles,
4. la réponse des théories à variables cachées : les objets ne sont accessibles que par leurs phénomènes, qui peuvent ne pas satisfaire les critères de réidentification spatio-temporelle des objets.
5. Changer de type d'objet : les objets sont déterminés uniquement par des variables compatibles, et réidentifiables par autre chose qu'une trajectoire.

Le point 1 a été présenté au chapitre 2. Le point 5 le sera au chapitre 5. Les autres points sont présentés dans les paragraphes suivants.

4-3 Une ontologie par fragments Le problème du point 2 est qu'une variable n'a pas de valeur tant qu'elle n'est pas mesurée. Dans les histoires de Griffiths la mesure révèle une valeur qui existe déjà. On reconstitue *a posteriori* ce qui s'est passé avant la mesure. Le problème est qu'il y a plusieurs histoires de Griffiths entre deux mesures.

En ce qui concerne l'identité, si l'on suppose que les états microscopiques ne sont pas équiprobables, alors on peut retrouver les statistiques quantiques pour des particules indiscernables, mais permutable. Pour que les états microscopiques ne soient pas équiprobables, il faut supposer une sorte de corrélation entre les particules. La difficulté est qu'il faut trouver la bonne corrélation pour avoir la bonne statistique et que, de plus, cette corrélation disparaisse dès que des critères d'identification sont de nouveau disponibles.

4-4 Changer les formes catégoriales

4-4-1 La logique quantique La remise en cause de la logique classique a naturellement conduit à créer de nouvelles logiques. D'une part, la création d'une nouvelle logique ne s'impose pas, d'autre part elles ont été créées pour des raisons de commodité, parce qu'elles conservent un langage courant.

La structure de la logique quantique de Birkhoff et von Neumann se rapproche de la structure d'un langage méta-contextuel, bien que ses créateurs en aient mal apprécié la portée. Mais ce n'est pas la seule forme de langage méta-contextuel possible.

4-4-2 La théorie des quasi-ensembles Les changements de la théorie des ensembles sont :

1. la définition de l'*extensionnalité*,
2. la définition du cardinal (nombre d'éléments).

⁵¹ La différence entre les bosons et les fermions est que ces derniers obéissent à la contrainte supplémentaire que deux fermions ne peuvent pas être dans le même état.

Pour le point 1, la théorie classique dit que deux ensembles sont identiques s'ils ont les mêmes éléments. La théorie des quasi-ensembles dit que deux ensembles sont identiques s'ils ont les mêmes éléments ou si tous leurs éléments sont indiscernables.

Lorsque les éléments d'un ensemble sont indiscernables, il n'est pas possible de les ordonner, et par conséquent il n'est pas possible de les dénombrer, d'où le point 2. La théorie des quasi-ensembles utilise le concept de *quasi-cardinal* comme concept primitif. C'est une sorte de cardinal sans ordinal.

Alors que cette théorie voulait sauver l'idée d'un monde composé d'une pluralité d'objets, elle montre en fin de compte son caractère hautement artificiel et annonce l'opportunité d'une refonte ontologique radicale (chapitre 5).

4-5 Les théories à variables cachées Ces théories veulent décrire les objets et non les phénomènes. Elle font des hypothèses sur les objets qu'elles manipulent. Plusieurs hypothèses sont possibles du moment que les phénomènes sont décrits correctement. Si ces théories n'apportent pas d'informations supplémentaires par rapport à la Mécanique Quantique, alors elles ne sont que des interprétations de la Mécanique Quantique, sinon elles ont le statut de théorie à part entière.

Il existe plusieurs théorèmes qui limitent le type de théorie à variables cachées. Parmi ceux-ci,

- le théorème de von Neumann qui se voulait une démonstration de l'inexistence des théories à variables cachées⁵² ;
- le théorème de Bell, qui se base sur l'hypothèse que les événements surviennent d'eux-mêmes et qu'ils ne s'influencent pas instantanément à distance arbitraire. Il aboutit à la conclusion que toute théorie à variables cachées compatible avec les prédictions de la Mécanique Quantique est *non locale*⁵³ ;
- le théorème de Kochen et Specker, qui montre que toute théorie à variables cachées compatible avec les prédictions de la Mécanique Quantique est *contextualiste*⁵⁴.

Le théorème de Bell date de 1964 [2] et a fait coulé beaucoup d'encre depuis. Il montre certaines inégalités qui devraient être vérifiées par les théories locales. Or les expériences et la Mécanique Quantique montrent que ces inégalités sont violées, prouvant ainsi qu'aucune théorie locale ne peut expliquer les expériences.

Pour résumer, ces inégalités font intervenir quatre observables A , A' , B et B' . La mesure simultanée des variables de type A avec les variables de type B est possible (A et A' sont compatibles avec B et B'), mais pas celle du même type (A et A' sont incompatibles, de même que B et B'). En supposant que les valeurs propres de ces quatre variables sont $+1$ et -1 , et en notant $c(A,B)$ la corrélation de A et B , on obtient [11]

$$|c(A,B') + c(B',A') + c(A',B) - c(B,A)| \leq 2, \quad (38)$$

si on a une théorie à variables cachées locale. Les inégalités de Bell impose donc une borne sur les mesures de corrélations. La Mécanique Quantique donne quant à elle,

$$|c(A,B') + c(B',A') + c(A',B) - c(B,A)| \leq 2\sqrt{2}. \quad (39)$$

52. Il a été interprété de cette façon, mais il semble que von Neumann n'ait jamais dit que les théories à variables cachées ne pouvaient pas exister [4].

53. L'interaction entre les objets a lieu sur une région étendue de l'espace, et non en une seule position spatiale ponctuelle.

54. Attention, le contextualisme est différent de la contextualité dont il était question jusqu'à maintenant. Il suppose que les propriétés existent avant le contexte expérimental et que la mise en place de celui-ci les modifie systématiquement.

Les expériences (d'A. Aspect en particulier) censées mesurer la quantité de l'équ. (38) donnent une valeur plus grande que 2 mais inférieure à $2\sqrt{2}$. Ce résultat est interprété comme la preuve de l'incapacité des théories locales⁵⁵.

4-5-5 La théorie de Landé Elle donne une vision mécaniste du monde, qui est composé exclusivement de corpuscules en mouvement. Les interactions (comme par ex. l'échange de quantité de mouvement) entre corpuscules sont quantifiées. Cette quantification fait que la théorie reproduit les aspects ondulatoires des expériences.⁵⁶

Cette théorie est contextualiste et non locale et reproduit certaines prédictions de la Mécanique Quantique. La non-localité se voit dans l'expérience des fentes d'Young lorsque "l'électron change sa quantité de mouvement en réaction aux composantes harmoniques de la distribution de matière du cache percé de deux fentes, *considéré comme un tout*".

4-5-6 La théorie de Bohm C'est la théorie à variables cachées la plus reconnue actuellement. Elle s'inspire de l'idée de l'onde-pilote développée par de Broglie en 1927. L'onde-pilote était une onde qui accompagnait et guidait tout corpuscule. L'onde de guidage de Bohm est l'onde ψ de la Mécanique Quantique. Elle exprime toujours la distribution statistiques des particules par le carré de son module $|\psi|^2$. Elle représente aussi un "potentiel quantique", qui fixe de façon univoque la trajectoire de chacune des particules⁵⁷. Le potentiel quantique est modifié par la présence d'appareils de mesure.

Cependant, l'interprétation de Bohm n'apporte pas, et ne pourra pas apporter de par sa nature, de nouveautés du point de vue expérimental.

5- Les nouvelles ontologies Selon Bitbol, la révolution quantique de 1925-1926 n'est pas encore achevée.

Le véritable changement de monde qu'évoque Kuhn, [...] est en train de se produire sous nos yeux.

5-1 Quasi-réalisme et relativité de l'ontologie

5-1-1 Questions internes et questions limites Pour Carnap, la question de l'existence d'une entité se pose à deux niveaux, qu'ils faut impérativement distinguer. Les questions internes, comme "les licornes existent-elles?", trouvent une réponse dans le cadre linguistique. Au contraire, les questions limites, comme "les choses existent-elles?" n'admettent pas de réponse dans un système linguistique donné.

55. Note personnelle : Un article récent [1] affirme que cette interprétation est erronée. Selon ce papier, l'équation (38) est valable dans le cas d'une interprétation fortement objective alors que la Mécanique Quantique ne peut pas être fortement objective. Il montre ensuite qu'une interprétation faiblement objective change la borne de l'équation (38) en 4 (et non pas 2). Du coup les théories à variables cachées ne seraient plus incompatibles avec la Mécanique Quantique et les expériences. Je ne sais pas si cet article dit vrai, mais il a un rapport certain avec l'interprétation de Bitbol. Cela reste à éclaircir.

56. Note personnelle : À voir.

57. Schématiquement, un potentiel peut se visualiser comme un paysage de vallées et collines plus ou moins régulières. La trajectoire de la particule est influencée par le potentiel comme le serait une rivière par un paysage.

5-1-2 Y a-t-il une ontologie des théories physiques? Le changement d'ontologie dans les sciences se heurte d'un côté à des objections philosophiques, et de l'autre côté à une excessive insouciance vis-à-vis de ces objections.

L'évolution des sciences suppose, selon A. Fine, une "stabilité de la référence à travers les paradigmes", c.-à-d. que la connaissance des *mêmes choses* se raffine de plus en plus. Admettre un changement d'ontologie, ce serait perdre les points de repères qui entraîne la convergence des théories scientifiques vers une Vérité.

Il faut renoncer à vouloir faire correspondre entité par entité les objets aux "choses telles qu'elles sont". Il faut cesser de croire que chaque entité représente un élément de réalité autonome et attacher plus de crédit à la structure *globale* des théories.

L'une des ontologies les plus "naturellement" adaptables aux théories quantiques est une ontologie d'*états* (les référents des vecteurs d'état)[...]

L'une des ontologies les plus "naturellement" adaptables aux théories relativistes est une ontologie d'*événements*.

L'ontologie des corps matériels n'est pas adaptée à la Mécanique Quantique à cause du défaut de reproductibilité des résultats expérimentaux pris individuellement. Elle n'est pas non plus adaptée à la relativité à cause de la convertibilité réciproque de la masse des corps en énergie ($E = mc^2$) qui fait qu'une propriété des choses (l'énergie) peut se transformer en choses (les corps matériels).

5-1-3 Signes avant-coureurs d'un changement d'ontologie Selon Redhead et Teller, l'ontologie de tradition corpusculaire nous engage à étiqueter les particules par la pensée, pour ensuite nous forcer à inventer des méthodes permettant de faire disparaître les conséquences de cet étiquetage. L'ontologie d'états de l'espace de Fock (voir § 5-2) suggérée par la théorie quantique des champs apparaît comme beaucoup plus opportune.

Selon Quine et d'Espagnat, il ne faut plus parler de particules, mais d'états possibles pour des emplacements de l'espace.

Le physicien H.D. Zeh a écrit un article sur la décohérence intitulé : "Il n'existe ni sauts quantiques, ni particules !"

5-2 L'inversion ontologique et le point de vue de l'ange Trois options peuvent être retenues pour l'interprétation de la Mécanique Quantique :

- les vecteurs d'état ne représentent *rien* du monde, mais sont juste un outil,
- ils représentent *quelque chose* du monde, comme l'"état" des particules ou leur onde-pilote,
- ils représentent *tout* du monde, ce sont les ondes en tant que seuls constituants du monde.

Ces trois options sont trop neutres pour qu'elles produisent un réel "changement de monde". Elle n'imposent ni interdisent un changement d'ontologie.

Une ontologie de vecteurs dans l'espace de Hilbert n'est viable que si ces nouvelles entités ne jouent pas le rôle de causes des affections instrumentales ou sensorielles.

Pour Schrödinger, en 1925-26, les ondes ψ sont les seules réelles. La superposition d'un grand nombre d'entre elles et les effets d'interférence constructive font qu'elles produisent un effet identique à celui d'un corpuscule. C'est le concept de "paquet d'ondes". La critique

principale était que ce paquet se disperse rapidement⁵⁸. Vers 1930, Schrödinger découvrait que la seule manière de rendre compte de l'interaction d'un objet avec un appareil était de considérer la fonction d'onde ψ représentant le système objet+appareil.

5-2-3 Les critères non métaphysiques d'un découpage ontologique Schrödinger a dressé une liste de trois critères nécessaires pour élever un système d'entités au rang d'ontologie. Les entités doivent

1. être aptes à exprimer, par leur évolution, une *connexion légale* entre les phénomènes successifs,
2. correspondre à des structures autonomes d'*anticipation* des réponses aux sollicitations expérimentales,
3. être individualisables, et réidentifiables dans le temps.

En Mécanique Quantique, la connexion légale n'est pas assurée par le concept de trajectoire, mais par l'évolution des vecteurs d'état donnée par l'équation de Schrödinger. C'est une connexion d'ordre probabiliste⁵⁹.

L'anticipation porte sur des distributions de grands nombres d'événements. Des travaux récents (voir Aharonov et al. (1993) et Dickson (1995) dans [3]) ont même permis d'accéder immédiatement, sans le passage par la règle de Born, aux caractéristiques distributives des observables, comme la moyenne et l'écart-type moyen.

Les vecteurs d'état sont individués en vertu de leur forme et position dans l'espace de Hilbert. Ils sont réidentifiables à travers le temps, car régis par une équation continue (équation de Schrödinger (20)), contrairement aux corpuscules. Du point de vue expérimental, cela se traduit par :

aucun producteur hypothétique de phénomènes discontinus *singulier* n'est individualisable ni réidentifiable; mais les *distributions statistiques* de ces phénomènes *dans un contexte expérimental donné* sont individualisables par leur configuration, et elles sont réidentifiables grâce à la continuité de leurs déformations au cours du temps⁶⁰.

5-2-7 Une ontologie de vecteurs d'état de l'espace de Fock Traditionnellement, la particule occupe la place de sujet dans les propositions associées au formalisme quantique. On dit aisément : "la particule P se trouve dans l'état $|\psi\rangle$ ".

Il faut d'une part réserver l'acte de dénomination aux états (les particules ne doivent plus porter d'étiquettes) et, d'autre part, placer les états en situation de sujet dans les propositions qui visent à caractériser l'objet de l'investigation.

Utilisons pour cela une métaphore due à Schrödinger. Supposons qu'on a trois écoliers, Tom, Dick, et Harry qui méritent une récompense. On n'a malheureusement que deux récompenses. Comment les distribuer? Supposons d'abord que les récompenses soient discernables (ou au moins permutable), par exemple une médaille d'or et une médaille d'argent.

⁵⁸. Note personnelle : Pourtant, l'image est intéressante, elle permet de visualiser comment une particule peut ne pas avoir de trajectoire: le paquet d'ondes se forme et déforme et passe ainsi d'un endroit à un autre.

⁵⁹. Prigogine [10] aboutit également à la conclusion que les trajectoires ne sont pas une bonne représentation et qu'il faut les remplacer par des distributions de probabilités.

⁶⁰. Note personnelle : Les études de Prigogine [10] portent aussi sur la dynamique des distributions. De plus, il va au-delà de l'espace de Hilbert. Mais ses vues restent controversées.

Avec la statistique de Maxwell-Boltzmann (voir annexe D, on obtient les 9 possibilités du tableau 2.

Tom	Dick	Harry
Or + Argent	-	-
-	Or + Argent	-
-	-	Or + Argent
Or	Argent	-
Or	-	Argent
-	Or	Argent
Argent	Or	-
Argent	-	Or
-	Argent	Or

TAB. 2 – Les 9 possibilités de distributions des 2 récompenses permutable aux trois élèves.

Supposons maintenant les récompenses indiscernables, impermutables, mais cumulables, comme ce serait le cas si les récompenses étaient une somme d'argent. On a alors les six possibilités de la statistique de Bose-Einstein données dans le tableau 3.

Tom	Dick	Harry
400	-	-
-	400	-
-	-	400
200	200	-
200	-	200
-	200	200

TAB. 3 – Les 6 possibilités de distributions des 2 récompenses (200€) impermutables aux trois élèves.

Enfin, si les récompenses ne sont pas cumulables, la statistique de Fermi-Dirac donne 3 façons de les répartir (c'est le tableau 3 sans les lignes où apparaît 400).

Quel est le rapport avec la Mécanique Quantique? Les récompenses représentent les particules, et les élèves représentent les états. En effet,

le comportement statistique effectif des électrons ne peut être illustré par aucune analogie qui les représente comme des choses identifiables.

Pour que l'état devienne sujet des propositions, cela ne suffit pas encore, il faut utiliser des espaces de Fock⁶¹. Nous avons vu que l'observable nombre est importante pour éviter d'utiliser le langage corpusculaire. Les valeurs propres d'une observable nombre forme les prédicats de certains états de l'espace de Fock. Les propositions sont du type: "l'état α_s (de l'espace de Fock) est n_s fois excité". Le nombre n_s correspond dans le langage de l'espace de Hilbert au nombre de particules qui sont dans l'état α_s .

5-2-8 Une ontologie d'UN vecteur d'état de l'espace de Fock Le modèle mécanique élémentaire dont le formalisme de Fock est dérivé par une procédure de quantification⁶² est le modèle de la corde vibrante. Une corde vibrante, fixée à ses deux extrémités,

61. Les espaces de Fock sont la somme directe d'espaces de Hilbert.

62. qu'on appelle *seconde quantification*, la première quantification portant sur les observables de l'espace de Hilbert.

est caractérisée par une série discrète de modes de vibrations (voir Fig. 11). Le modèle a

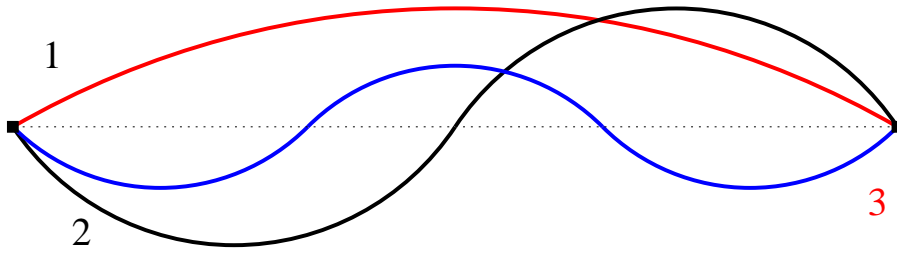


FIG. 11 – Les trois premiers modes de vibration de la corde vibrante.

trois éléments principaux :

- le sujet des vibrations (la corde),
- les modes de vibration (les ondes stationnaires),
- et l'intensité des vibrations (l'énergie répartie sur les divers modes).

Chaque mode peut être traité comme s'il était un oscillateur harmonique *indépendant*. Le mode correspond à l'état α_s , et l'intensité des vibrations correspondent au nombre n_s de quanta d'excitation.

Tout vecteur d'état associé à N particules dérive d'un unique vecteur $|\mathbf{S}\rangle$ de l'espace de Fock :

$$|\psi\rangle = \eta_1^{n_1} \eta_2^{n_2} \eta_3^{n_3} \cdots |\mathbf{S}\rangle. \quad (40)$$

Les opérateurs η_s sont des opérateurs de création. L'action de η_s sur le vecteur d'état $|\mathbf{S}\rangle$, notée $\eta_s|\mathbf{S}\rangle$, crée une particule dans l'état α_s . Autrement dit, le mode α_s est excité une fois. Lorsque l'on écrit

$$\eta_s^{n_s} |\mathbf{S}\rangle = \eta_s \times \eta_s \times \cdots \times \eta_s |\mathbf{S}\rangle$$

l'opérateur η_s agit n_s fois sur $|\mathbf{S}\rangle$; il crée n_s particules dans l'état α_s .

Dans ce formalisme, $|\mathbf{S}\rangle$ représente l'unique sujet des excitations quantiques. Il est le seul élément d'ontologie. Mais quel est ce quelque chose que représente cette entité ? En fait, l'observable nombre appliquée au vecteur d'état $|\mathbf{S}\rangle$ a pour valeur propre 0, c.-à-d. que $|\mathbf{S}\rangle$ traduit un état où aucun mode n'est excité (où il n'y a pas de particule). Le sujet des excitations quantiques $|\mathbf{S}\rangle$ est donc le *vide*, ou plus précisément le *vide quantique*.

5-3 La voie d'un retour au monde de l'attitude naturelle : la décohérence On a vu que lors d'une mesure, il y a un vecteur d'état objet+appareil qui est global et non factorisable. Du coup, il ne s'agit plus de décrire la suite d'événements qui conduisent les propriétés d'un objet à modifier de proche en proche certaines propriétés de l'appareil de mesure. Mais il s'agit plutôt de montrer, à partir d'un vecteur d'état global, peuvent émerger des macro-structures interprétables comme propriétés manifestes d'un appareil.

Le but des théories de la décohérence est de résoudre le *problème de la continuité ascendante*, plus connu sous le nom de *problème de la mesure* ou *problème du raccord*.

5-3-1 Le problème de la mesure, version prédictive Le formalisme de la Mécanique Quantique, dans sa version instrumentale, peut être étendu de façon à ce que le vecteur d'état $|\psi\rangle$ prenne en compte également l'appareil M_A qui mesure l'observable A . La mesure

avec l'appareil M_A est incluse dans la phase de préparation que décrit $|\psi\rangle$. On a besoin de nouveaux appareils de mesure : M'_A qui mesure la valeur de A comme le faisait M_A et un deuxième appareil de mesure M_A^* (par exemple une caméra qui lit le résultat obtenu par M'_A). Ce dispositif donne la même probabilité d'obtenir a_i lors de la mesure de A^* que lors de la mesure initiale de A . Et c'est bien là le problème, car les probabilités obtenues ainsi conservent des effets d'interférences.

5-3-2 Le problème de la mesure, version descriptive Selon la perspective que le vecteur d'état représente l'état du système, le problème de la mesure est encore plus flagrant. Le vecteur d'état global décrit l'objet+l'appareil, mais il n'est pas possible d'affecter un état à l'objet, et un état à l'appareil. Or, les expérimentateurs savent bien que les appareils sont toujours dans un état défini. C'est le paradoxe illustré par le chat de Schrödinger, où le chat sert d'appareil de mesure à deux états possibles (vivant ou mort).

5-3-3 La décohérence entre les interprétations prédictive et descriptive de la Mécanique Quantique Les objectifs des théories de la cohérence n'ont pas été clairement fixés dès le début (en 1982 avec Zurek). Deux voies se dessinent pour ces théories :

- soit elles doivent seulement assurer une compatibilité satisfaisante entre le formalisme prédictif et les notions pré-comprises d'événement ou de propriété sur lesquelles portent le calcul ;
- soit elles doivent montrer comment une description quantique peut conduire à notre univers classique d'événements survenant d'eux-mêmes et de propriétés possédées par des objets.

5-3-4 Décohérence : le programme faible Les deux principales contraintes imposées pour parvenir à la décohérence sont :

- l'univers doit être divisé en sous-systèmes. Les trois sous-systèmes d'une expérience sont l'objet, l'appareil de mesure et l'environnement,
- les états macroscopiques émergents doivent être prévisibles (déterministes).

Le processus d'évolution du vecteur d'état global aboutit à une double sélection :

- seules les observables associées à la prévisibilité du domaine classique subsistent,
- les termes d'interférences deviennent négligeables dès lors qu'il y a interaction entre l'objet et l'appareil de mesure.⁶³

5-3-5 Décohérence : le programme fort Le but est de montrer que d'un univers représenté par un vecteur d'état global émergent spontanément des traits quasi classiques. Pour cela, Gell-Mann et Hartle découpent l'ensemble des histoires de Griffiths et regroupent les sous-ensembles en *histoires décohérentes*.

Le découpage est cependant difficile à justifier. Et même une fois le découpage justifié, il reste le choix d'une histoire décohérente parmi l'ensemble des histoires décohérentes.

⁶³. Note personnelle : Dans l'expérience des fentes d'Young, si on a une précision suffisante sur l'intensité lumineuse sur l'écran de détection, ne devrait-on pas avoir un moyen de détecter de légères interférences même dans le cas où un détecteur est présent à l'une des fentes ?

4 Conclusion

Nous avons rencontré différentes conceptions de la Mécanique Quantique :

- Les physiciens “réalistes” voient la Mécanique Quantique comme la description du comportement de la nature. Celle-ci doit avoir un comportement de type quantique (échanges discrets et propagation d’ondes) ou une structure qui conduit à un comportement quantique.
- Les positivistes logiques du cercle de Vienne réduisent la Mécanique Quantique à un ensemble de règles opératoires permettant de prédire des faits.
- Un troisième point de vue est de justifier la Mécanique Quantique par le fait que sa structure est la traduction d’un formalisme prédictif général œuvrant sur des probabilités d’événements définis relativement à un contexte.

La première de ces trois positions suppose l’existence d’objets donnés d’avance ; la seconde position suppose l’existence de faits donnés. La dernière position ne suppose pas une réalité structurée, mais invite à penser que les faits sont créés par la procédure expérimentale de recherche plutôt que donnés d’avance. Ce dernier point de vue montre qu’au débat traditionnel *réalisme structurel / positivisme* est venu s’ajouter un nouvel axe de réflexion *pragmatisme transcendantal / réalisme dispositionnel*. Cette position ouvre tout un débat sur l’objectivité de la science. La science n’aurait plus une réalité absolue à décrire et expliquer, mais ses procédures mêmes contribueraient à créer la réalité...

Je terminerai sur le point qui me paraît important de retenir au terme de ce résumé, en citant une fois de plus Bitbol :

La quantification et les effets d’interférence peuvent être obtenus comme conséquences de la contextualité des déterminations anticipées.

A Rappels de logique classique

La logique classique se base sur quelques règles fondamentales (définies par l'algèbre de Boole). La logique des prédicats analyse avec précision les énoncés où interviennent un sujet et l'attribut de qualité. Ex: "Aristote est sage". Cette analyse se fait à l'aide de symboles mathématiques qui sont principalement :

- la conjonction, notée \wedge , p et q ,
- la disjonction, notée \vee , p ou q ,
- la négation, notée \neg , non p ,

où p et q sont des propositions du style :

- p : "il pleut",
- q : "les oiseaux chantent".

À ces *connecteurs* viennent s'ajouter des *quantificateurs* :

- \forall "pour tout", "quelque soit". Ex: $\forall x$, pour tout individu $x \dots$
- \exists "il existe". Ex: $\exists x$ "il existe un individu $x \dots$ "

Les axiomes de l'algèbre de Boole sont au nombre de 3 [3, p. 434]:

1. commutativité:

$$\begin{aligned}p \wedge q &= q \wedge p \\p \vee q &= q \vee p\end{aligned}$$

2. distributivité:

$$\begin{aligned}p \wedge (q \vee r) &= (p \wedge q) \vee (p \wedge r) \\p \vee (q \wedge r) &= (p \vee q) \wedge (p \vee r)\end{aligned}$$

3. tautologie et contradiction :

- $\forall p, \exists t t \wedge p = p$; c.-à-d. que t est toujours vraie, c'est une tautologie;
- $\forall p, \exists c c \vee p = p$; c.-à-d. que c est toujours fausse, c'est une contradiction.

Les axiomes s'énoncent aussi pour la théorie des ensembles.

B Rappel sur les nombres complexes

Soit a un nombre complexe, a s'écrit

$$a = x + iy \text{ avec } x, y \text{ des nombres réels.}$$

i est le nombre imaginaire pur défini par $i^2 = i * i = -1$. Un nombre complexe peut se représenter dans le plan (voir Fig. 12).

Le conjugué complexe de a se note a^* et vaut $x - iy$. Le module d'un nombre complexe, noté $|a|$, est sa longueur et vaut

$$|a| = \sqrt{x^2 + y^2}$$

d'après Pythagore. On a aussi

$$|a| = \sqrt{a * a^*},$$

puisque

$$a * a^* = (x + iy) * (x - iy) = x^2 - ixy + ixy + y^2 = x^2 + y^2 = |a|^2.$$

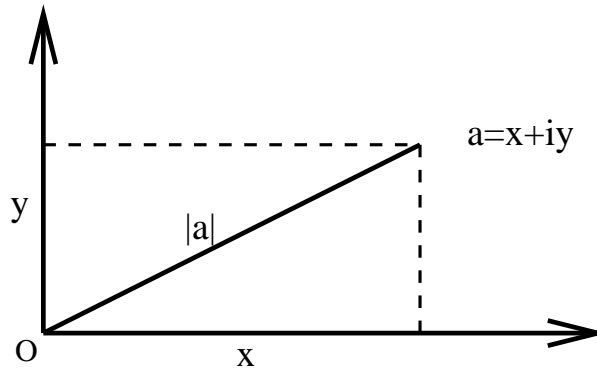


FIG. 12 – Représentation d'un nombre complexe.

C Les différentes conceptions de la probabilité

Les probabilités sont intimement liées à la théorie des ensembles. On les représente couramment comme le nombre de cas favorables rapportés au nombre de cas possibles. Prenons l'exemple du jeté de dé et demandons-nous nos chances d'obtenir 1 ou 6. L'ensemble des cas favorables est donc 1 et 6, on le note $\{1,6\}$. Il contient 2 éléments. Pour un dé à 6 faces, l'ensemble des cas possibles est $\{1,2,3,4,5,6\}$. Cet ensemble contient 6 éléments. La probabilité recherchée est donc $2/6$, c.-à-d. une chance sur trois pour que l'on ait 1 ou 6 lors du jeté de dé. Ceci nous donne la définition ensembliste des probabilités. Il existe 4 autres définitions pour la notion de probabilité. Sans entrer dans les détails, il suffit de savoir que ces autres définitions sont relativement semblables à celle-ci d'un point de vue formel.

Les cinq conceptions de la probabilité sont (voir les références dans [3, p. 89]) :

1. le degré de croyance qu'entretiennent les personnes au sujet de l'occurrence d'un événement,
2. le degré de croyance qu'un certain corpus de connaissances préalables conduit rationnellement à entretenir au sujet de l'occurrence d'un événement (la définition laplacienne – nombre de cas favorables sur nombres de cas possibles – rentre dans cette catégorie),
3. la fréquence relative d'occurrence d'un certain type d'événements à l'intérieur d'une séquence temporelle d'événement suffisamment longue,
4. l'inverse du rapport de la population d'un ensemble de systèmes physiques identiques, à la population de l'un de ses sous-ensembles caractérisé par une certaine plage de valeurs des variables d'état,
5. la potentialité ou propension d'un événement à se produire dans un contexte donné et plus particulièrement à la suite d'une préparation expérimentale donnée.

D Les différentes statistiques sur un exemple

Soient deux particules A et B pouvant être dans deux états 1 et 2. La statistique classique dénombre 4 états macroscopiques possibles :

- A et B dans l'état 1,

- A et B dans l'état 2,
- A dans l'état 1 et B dans l'état 2,
- A dans l'état 2 et B dans l'état 1.

La statistique de Bose-Einstein en compte seulement 3 (A et B étant indiscernables, $B=A$) :

- A et A dans l'état 1,
- A et A dans l'état 2,
- A dans l'état 1 et A dans l'état 2.

Enfin, celle de Fermi-Dirac compte un seul état possible (les 2 particules ne pouvant être dans le même état) :

- A dans l'état 1 et A dans l'état 2.

E Les principaux acteurs de la révolution quantique

Des biographies détaillées peuvent être lues sur la page web de la fondation Nobel et sur l'archive MacTutor (voir annexe F).

- Ludwig Boltzmann : 20 fév. 1844 - 5 oct. 1906, Autriche.
- Niels Henrik David Bohr : 7 oct. 1885 - 18 nov 1962, Danemark, prix Nobel de Physique en 1922 pour ses travaux sur la structure des atomes.
- Arthur Holly Compton : 10 sept. 1892 - 15 mars 1962, USA, prix Nobel de Physique en 1927 (partagé avec Charles Thomson Rees Wilson) pour la découverte de l'effet Compton.
- Albert Einstein : 14 mars 1879 - 18 avr. 1955, Allemagne, prix Nobel de Physique en 1921 pour ses travaux en Physique Théorique et sa découverte de l'effet photoélectrique.
- Werner Karl Heisenberg : 5 déc. 1901 - 1 fév. 1976, Allemagne, prix Nobel de Physique en 1932 pour la création de la Mécanique Quantique.
- Wolfgang Ernst Pauli : 25 avr. 1900 - 15 déc. 1958, Autriche.
- Max Karl Ernst Ludwig Planck : 23 avr. 1858 - 4 oct. 1947, Allemagne, prix Nobel de Physique en 1918 pour sa découverte des quanta d'énergie.
- Ernest Rutherford : 30 août 1871 - 19 oct. 1937, Angleterre, prix Nobel de chimie en 1908 pour ses travaux sur la désintégration des éléments et sur la chimie des substances radioactives.
- Arnold Johannes Wilhelm Sommerfeld : 5 déc. 1868 - 26 avr. 1951, Allemagne.

F Quelques url intéressantes

Je donne ici quelques sites internet que j'ai trouvé intéressants lors de mes recherches.

The MacTutor History of Mathematics archive :

<http://www-gap.dcs.st-and.ac.uk/~history/index.html>

Fundamental Concepts of Century Physics (avec notamment un paragraphe sur le langage) :

<http://www.ph.utexas.edu/~gleeson/httb/httb.html>

Page officielle de la fondation Nobel :

<http://www.nobel.se/index.html>

Histoire des prix Nobel :
<http://www.nobel.se/physics/articles/karlsson/index.html>
Excellent site sur Heisenberg :
<http://www.aip.org/history/heisenberg/>
Best of History of Physics :
<http://physicsweb.org/bestof/history>
<http://physicsweb.org/bestof/atomic>
Autres sites :
<http://web.fccj.org/~ethall/quantum/quant.htm>

Références

- [1] Guillaume ADENIER. « A Refutation of Bell's Theorem ». <http://fr.arxiv.org/abs/quant-ph/0006014>, 2000.
- [2] J. S. BELL. « On the Einstein-Podolsky-Rosen Paradox ». *Physics*, 1:195–200, 1964.
- [3] Michel BITBOL. *Mécanique Quantique: une introduction philosophique*. Champs Flammarion, 1996.
- [4] John F. CLAUSER. Early history of Bell's theorem. Dans R. A. BERTLMANN et A. ZEILINGER, éditeurs, *Quantum [un]speakable. From Bell to Quantum Information.*, pages 61–98. Springer-Verlag, 2002.
- [5] Claude COHEN-TANNOUJDI, Bernard DIU, et Franck LALOË. *Mécanique quantique*, volume I et II. Hermann, 1973.
- [6] P. GRANGIER. « Une fondamentale étrangeté ». *Science et Vie*, 186:8–14, mars 1994. Hors série.
- [7] Werner HEISENBERG. *La partie et le tout, le monde de la physique atomique*. Champs Flammarion, 2001.
- [8] Erik B. KARLSSON. « The Nobel Prize in Physics 1901-2000 », 2000. <http://www.nobel.se/physics/articles/karlsson/index.html>.
- [9] Helge KRAGH. « Max Planck: the reluctant revolutionary ». *Physics World*, page 31, December 2000. <http://physicsweb.org/article/world/13/12/8>.
- [10] Ilya PRIGOGINE. *La fin des certitudes*. Poches Odile Jacob, 1996.
- [11] Angel G VALDENEBRO. « Assumptions underlying Bell's inequalities ». *European Journal of Physics*, 23(5):569–577, 2002.

Table des matières

1	Brefs rappels de physique classique	3
1.1	Avant la Mécanique Quantique : le monde classique	3
1.1.1	La vision corpusculaire	3
1.1.2	La vision ondulatoire	4
1.1.3	Limites de la physique classique	5
2	Naissance de la Mécanique Quantique	6
2.1	Les débuts de la mécanique quantique	6
2.2	Quelques expériences décisives	8
2.2.1	L'expérience de diffraction d'Young	8
2.2.2	L'expérience des fentes d'Young	8
3	Résumé de l'interprétation de M. Bitbol	10
3.1	Introduction	10
3.2	Résumé et extraits de [3]	11
	1- Le Possible, le Probable, et les contextes.	11
	1-1-5 Indéterminisme et prédiction.	11
	1-1-6 Événements, propriétés, relations.	12
	1-1-7 Prédire, point final	14
	1-2 Le domaine des possibles	14
	1-2-2 Une expérience de pensée, version classique	14
	1-2-3 Premières restrictions sur cette expérience de pensée	15
	1-2-4 Multiplicité des contextes, unité de la logique	16
	1-2-5 Un langage décontextualisé	16
	1-2-6 Faut-il garder le silence?	17
	1-2-7 La Mécanique Quantique et la pluralité des contextes	17
	1-2-8 Questions et observables	17
	1-2-9 Langages expérimentaux et logiques contextuelles booléennes	18
	1-2-10 Langages méta-contextuels	19
	1-2-11 Les langages expérimentaux et leur terminologie épurée	20
	1-2-12 Un clivage microscopique-macroscopique?	20
	1-2-13 L'ombre portée du concept de corpuscule matériel dans le langage expérimental	21
	1-3 Probabilités, projections, et prédictions	23
	1-3-1 La pluralité des concepts de probabilité	23
	1-3-2 Objectivité, subjectivité, et probabilité	23
	1-3-3 Les probabilités entre épistémologie et ontologie	23
	1-3-4 Temps et probabilités	23
	1-3-5 Les probabilités et l'aventure de la projection	23
	1-3-6 Probabilités, événements, et principe de bivalence	24
	1-3-7 Que serait un monde sans le principe de bivalence?	24
	1-3-8 Un calcul des probabilités sans événements	25
	2- La Mécanique Quantique comme schéma prédictif contextuel	26
	2-2 Préparer	27
	2-2-1 Vecteurs d'état et préparations	27
	2-2-3 Vecteurs d'état et interférences	30

2-2-4 Vecteurs d'état et nombres complexes	31
2-3 Évoluer	31
2-3-1 Représentation de Schrödinger et représentation de Heisenberg	31
2-3-2 L'équation de Schrödinger	32
2-4 Mesurer	33
2-4-1 Conjonctions, corrélations et "non-séparabilité"	33
2-4-2 Observables incompatibles et règles de quantification	35
2-4-3 La réduction du vecteur d'état	36
2-4-4 La "réduction du paquet d'onde" dans l'histoire	38
2-5 Contexte et unité conceptuelle	38
3- Ce qui reste des <i>images du monde</i>	38
3-1 L'image et l'objet	38
3-1-1 Quatre orientations sur les images	39
3-1-3 Une méta-image: l'interaction entre appareil et objet	39
3-2-1 Le phénomène et la perturbation	39
3-2-2 Le phénomène et sa définition holistique	39
3-2-3 L'objet et l'observation	40
3-3 Heisenberg, les relations d'"incertitude", et les expériences de pensée	40
3-3-1 Précision ou prévision?	40
4- Objets anciens et théorie nouvelle: le prix du conservatisme onto- logique	41
4-1-1 Catégories et expérience	41
4-1-3 Prédicats et substrats	41
4-2 De la chose à l'objet de la physique quantique	42
4-2-2 La mise à l'épreuve de la prédication et de la dénomination	42
4-2-3 La multiplicité des options ontologiques disponibles	43
4-3 Une ontologie par fragments	43
4-4 Changer les formes catégoriales	43
4-4-1 La logique quantique	43
4-4-2 La théorie des quasi-ensembles	43
4-5 Les théories à variables cachées	44
4-5-5 La théorie de Landé	45
4-5-6 La théorie de Bohm	45
5- Les nouvelles ontologies	45
5-1 Quasi-réalisme et relativité de l'ontologie	45
5-1-1 Questions internes et questions limites	45
5-1-2 Y a-t-il une ontologie des théories physiques?	46
5-1-3 Signes avant-coureurs d'un changement d'ontologie	46
5-2 L'inversion ontologique et le point de vue de l'ange	46
5-2-3 Les critères non métaphysiques d'un découpage ontologique	47
5-2-7 Une ontologie de vecteurs d'état de l'espace de Fock	47
5-2-8 Une ontologie d'UN vecteur d'état de l'espace de Fock	48
5-3 La voie d'un retour au monde de l'attitude naturelle: la décohérence	49
5-3-1 Le problème de la mesure, version prédictive	49
5-3-2 Le problème de la mesure, version descriptive	50
5-3-3 La décohérence entre les interprétations prédictive et descrip- tive de la Mécanique Quantique	50

5-3-4 Décohérence: le programme faible	50
5-3-5 Décohérence: le programme fort	50
4 Conclusion	51
A Rappels de logique classique	52
B Rappel sur les nombres complexes	52
C Les différentes conceptions de la probabilité	53
D Les différentes statistiques sur un exemple	53
E Les principaux acteurs de la révolution quantique	54
F Quelques url intéressantes	54