

UNIVERSITE DE PARIS I - PANTHEON-SORBONNE

**LANGAGE, MECANIQUE QUANTIQUE
ET
REALITE**

Un essai sur la pensée de Niels Bohr

**Thèse de Doctorat
présentée
par**

JAIRO ROLDAN-CHARRIA

Directeur de recherche:

M. Le Professeur

BERNARD d'ESPAGNAT

Novembre de 1990

A ma femme
KAREM
et à mes enfants
ANGELA MARIA et JOSE DAVID

REMERCIEMENTS

Je tiens à exprimer toute ma reconnaissance à Monsieur le Professeur Bernard d'Espagnat pour l'attention avec laquelle il a écouté toutes mes questions, et pour les nombreux conseils et encouragements qu'il m'a prodigués.

Je remercie l'Universidad del Valle pour la bourse et le congé d'études qu'elle m'accorde de novembre 1984 à juin 1987 afin de me rendre à Paris pour commencer et avancer les recherches qui ont abouti à ce Thèse.

Je remercie également Monsieur et Madame M. Monfils, Monsieur J.M. Lepain et Monsieur le Professeur G. Mathieu, pour leur assistance linguistique qui a fait en sorte que ce texte soit lisible.

J'adresse aussi mes remerciements les plus profonds à mon épouse pour le soin apporté à la réalisation matérielle de ce travail et pour le support moral permanent dont elle a fait preuve à mon égard tant que durèrent mes recherches et qui a abouti à la rédaction de ce Thèse.

INTRODUCTION

Si on demande à un physicien quelle est l'interprétation qu'il donne au formalisme quantique la plupart d'entre eux répondront qu'ils adhèrent à l'interprétation dite de Copenhague. Cependant dans la pratique il est assez probable qu'ils changent les règles du jeu sans s'en apercevoir. Une des raisons de cette situation est peut être que l'interprétation en question est fondée surtout sur les idées de Niels Bohr, et sa pensée n'est pas suffisamment connue. En effet, dans la plupart des manuels de mécanique quantique il n'y a que quelques paragraphes sur certaines des thèses de Bohr. Il y a également le fait que les écrits de Bohr sont à la fois profonds et obscurs. En plus de son importance pour mieux comprendre l'interprétation du formalisme quantique une étude de la pensée de Bohr est également intéressante du point de vue philosophique puisque ses idées ont beaucoup d'implications générales et sont évocatrices de nouvelles études.

Dans cette Thèse un essai sur la pensée de Niels Bohr est présenté en s'appuyant sur ses écrits originels. Sans prétendre nier les influences philosophiques possibles sur sa pensée, nous mettrons l'accent sur les faits scientifiques qui ont aidé Bohr à donner une forme définitive et concrète à ses idées.

Dans le premier chapitre nous étudions la conception bohrienne du but et de la tâche de la science. Celle-ci est avant tout pour Bohr une affaire de communication: son but exclusif est d'augmenter et d'ordonner l'expérience humaine communicable sans ambiguïté.

Nous faisons quelques commentaires sur certaines idées de Bohr au sujet de la science et nous proposons comme critère de scientificité l'emploi d'un langage dénué d'ambiguïté. On peut se demander quel sera ce langage. Sera-t-il celui des mathématiques, étant donné que celles-ci constituent un langage précis et non-ambigu? Ou bien sera-t-il possible d'avoir plusieurs langages dénués d'ambiguïté?

Dans le chapitre 2 nous analysons la réponse de Bohr aux questions précédentes. Nous montrons que l'un des aspects les plus fondamentaux de la pensée de Bohr est sa thèse selon laquelle le langage courant non seulement permet d'arriver à la non-ambiguïté mais est le seul langage que nous possédons (et que nous posséderons jamais) que nous puissions parvenir à employer sans ambiguïté. Cette thèse nous l'appelons *l'unicité du langage courant*. Nous nous demandons quels sont les éléments du langage courant que Bohr considère comme indispensables pour une communication exempte d'ambiguïté et nous concluons que ces éléments sont, selon lui la localisation dans l'espace et le temps et la causalité. Il faut préciser que par causalité, Bohr entend le déterminisme de la physique classique.

L'importance de la thèse de l'unicité du langage courant dans la pensée de Bohr vient du fait qu'à partir des considérations sur la non-validité du langage ordinaire dans les phénomènes quantiques, Bohr en vient à considérer le quantum d'action et ses propriétés comme quelque chose à accepter sans aucune interprétation additionnelle possible. Et ces propriétés du quantum d'action l'amènent finalement à sa conception de la réalité physique.

Dans le chapitre 3 nous rappelons les difficultés bien connues que les régularités quantiques présentent lorsque l'on tente de les analyser en termes de concepts classiques. Nous montrons comment ces difficultés convainquirent Bohr de la nécessité impérieuse et irrévocable de renoncer à l'explication classique de l'existence du quantum d'action. Ce dernier doit, selon lui, s'accepter comme une chose fondamentale qui n'admet ni ne requiert d'explication. Une fois que l'on accepte le quantum d'action en tant qu'élément irréductible, il est nécessaire de

trouver et d'analyser les conséquences qui en découlent. Nous identifions trois conséquences: le caractère de totalité des processus atomiques, l'indivisibilité entre l'objet et l'instrument d'observation et le caractère essentiellement statistique de la mécanique quantique.

La nécessité d'employer les concepts classiques pour décrire les expériences mêmes qui fournissent l'information sur les régularités quantiques et l'impossibilité de créer un nouveau langage qui pourrait éventuellement les expliquer, constituent pour Bohr le paradoxe quantique. Pour résoudre ce paradoxe Bohr créa une nouvelle manière d'employer le langage: le mode complémentaire de description.

Le mode complémentaire de description ou plus simplement la complémentarité est le sujet du chapitre 4. La complémentarité est proposée par Bohr comme une nouvelle relation logique entre les concepts du langage courant, comme un développement rationnel du langage commun, comme une manière d'amplifier ce cadre conceptuel de telle façon qu'il soit possible d'exprimer des expériences qui sont hors du champ de validité du langage courant sans avoir besoin d'abandonner celui-ci.

Bohr a été souvent critiqué pour n'avoir pas donné une définition précise de l'idée de complémentarité. Einstein a écrit à ce propos que malgré tous les efforts qu'il avait faits il n'était pas parvenu à une formulation précise du principe de complémentarité de Bohr. L'affirmation d'Einstein, non seulement exprime la critique en question, mais illustre la difficulté de trouver une définition que Bohr lui-même n'a nullement présentée explicitement dans ses écrits. Nous croyons pourtant qu'il est possible de définir avec précision la complémentarité si l'on prend en compte les thèses linguistiques de Bohr et ses considérations sur l'impossibilité fondamentale d'analyser l'existence de h et la totalité qu'elle confère aux phénomènes quantiques.

Nous présentons une série des propositions comme une définition précise du mode complémentaire de description. Au moyen de la terminologie introduite nous montrons en particulier que le problème de la mesure ne se présente pas chez Bohr.

En analysant la suggestion de Bohr d'employer le mode complémentaire de description comme solution au problème fondamental de la mécanique statistique nous identifions une nouvelle sorte de totalité que nous pouvons qualifier de thermodynamique.

Finalement nous analysons les tentatives de Bohr pour utiliser la complémentarité dans des domaines différents de la physique.

Dans le chapitre 5 nous étudions ce qui constitue peut-être l'intuition la plus significative de Bohr. Il s'agit de l'indivisibilité entre les instruments et les objets quantiques. L'importance de cette idée vient du fait que même si l'on rejette les *à priori* philosophiques de Bohr, tels que sa thèse sur le langage courant ou son refus d'ontologie, même si l'on considère que son interprétation est déjà dépassée, même si on la dit incompréhensible, ou floue, même si par opposition, on adhère au réalisme, voire au réalisme physique, il reste que, par son idée d'indivisibilité, Bohr a apporté quelque chose qui s'est avéré être très proche de la vérité, puisque la non-séparabilité est maintenant établie.

Au chapitre 6 nous terminons notre exposé sur les thèses de Bohr en examinant sa conception de la réalité physique. Notre conclusion est que selon ses idées aucun objet physique n'a des propriétés en soi. Une analyse critique de la conclusion de Bohr selon laquelle aucune ontologie n'a de place dans son interprétation de la mécanique quantique montre

cependant que la conclusion en question n'est pas contraignante. L'on ne peut pas soutenir en conséquence que c'est Bohr le vainqueur dans le grand débat avec Einstein sur la nature de la réalité physique.

Bohr et Heisenberg sont considérés comme les fondateurs de l'interprétation "orthodoxe" de la mécanique quantique, interprétation qui est connue par le nom d'interprétation de Copenhague. Si cette interprétation existe il est raisonnable de dire qu'elle ne peut être que l'intersection entre les thèses de Bohr et Heisenberg. Nous analysons au chapitre 7 les idées de Heisenberg et notre analyse nous conduit à la conclusion de que strictement il n'existe pas une interprétation de Copenhague, c'est-à-dire que l'intersection des thèses de Heisenberg et Bohr ne constitue pas vraiment une interprétation du formalisme quantique. Nous proposons que l'on parle soit de l'"interprétation de Bohr" soit de l'"interprétation de Heisenberg" quand on veut se référer aux "interprétations orthodoxes" de la mécanique quantique.

Dans le chapitre 8 nous étudions les thèses de Wheeler, d'Espagnat et Bohm. Wheeler prend les idées de Bohr comme fondement pour proposer une théorie qui permettrait de comprendre l'existence et l'origine de l'univers. Sa théorie est une cosmogénèse non-ontologique.

Nous concluons qu'il existe une ressemblance entre la thèse de Bohr de l'unicité du langage et la thèse linguistique implicite chez d'Espagnat, appelée pour nous l'impuissance du langage.

Finalement il est montré que dans la théorie de Bohm se trouve un aspect de totalité qui, à différence de la totalité bohrienne, est conceptuellement analysable.

Dans le chapitre 9 nous organisons en trois catégories les conclusions auxquelles nous avons abouti après l'analyse présentée aux 8 chapitres précédents: tout d'abord nous présentons des conclusions sur le langage, ensuite viennent celles sur la mécanique quantique proprement dit, en enfin nous exposons celles relatives à la réalité.

Ces trois catégories ne sont pas indépendantes les unes des autres et si nous les avons explicitement séparées c'est pour mieux indiquer qu'il s'agit des conséquences découlant du langage, de son rôle dans la science, et de la relation qui existe entre la réalité et le même langage; conséquences qui se dégagent d'une analyse approfondie des interprétations du formalisme quantique.

Ces trois catégories de conclusions justifient le titre de notre Thèse: Langage, Mécanique Quantique et Réalité.

CHAPITRE 1

LA SCIENCE SELON BOHR

Il est convenable de commencer l'étude de la pensée de Niels Bohr par sa conception du but et de la tâche de la science. Celle-ci est avant tout pour Bohr une affaire de communication: son but *exclusif est d'augmenter et d'ordonner l'expérience communicable sans ambiguïté.*

Nous ferons quelques commentaires sur certaines idées de Bohr au sujet de la science et nous proposerons comme critère de scientificité l'emploi d'un langage dénué d'ambiguïté.

1.1 LE BUT DE LA SCIENCE SELON BOHR

On trouve la conception de Bohr sur le but et la tâche de la science dans plusieurs citations, telles que les suivantes:

"(...) (la science) consiste en efforts systématiques pour augmenter notre expérience et développer les concepts appropriés à sa mise en ordre (...) "¹

"(...) par le mot d'"expérience", nous nous référons à une situation où nous pouvons dire à d'autres hommes ce que nous avons fait et ce que nous avons appris; il en résulte que la description du dispositif expérimental et des résultats des observations doit être exprimée en un langage dénué d'ambiguïté."²

"(...) la science physique s'occupe du développement de méthodes générales visant à la compréhension de l'expérience humaine commune."³

"Tout savant, (...), se trouve constamment devant le problème d'une description objective de l'expérience, ce qui, pour nous, n'est rien d'autre qu'une communication sans ambiguïté" ⁴

"Par description objective, nous ne pouvons comprendre, d'un point de vue logique, qu'une communication de l'expérience à d'autres hommes, au moyen d'un langage qui n'admet aucune ambiguïté en ce qui concerne la perception d'une telle communication."⁵

"La description des phénomènes atomiques a (...) un caractère parfaitement objectif, en ce sens qu'aucune référence explicite n'est faite à un observateur individuel et que, par conséquent, (...), aucune ambiguïté n'est impliquée dans la communication de l'expérience."⁶

"(...) toute référence au sujet observateur, (...) deviendra un obstacle à la communication

¹ Bohr, N; **Physique Atomique et Connaissance Humaine** (Gauthier Villars, Paris, 1957) p. 121 (Il sera désigné par P)

² P, p.58-59

³ Bohr, N; "Physical Science and the Study of Religions" dans **Studia Orientalia Ionni Pedersen Septuagenario** (Einer Munksgaard, 1953) p.385-390. (Toutes les citations qui viennent de références en Anglais ont été traduites par J.R.CH.)

⁴ P, p.101

⁵ Réf. (2)

⁶ Bohr, N; **Essays 1958-1962 on Atomic Physics and Human Knowledge**, (Interscience Publishers, New York 1963) p.3 (Il sera désigné par E).

sans ambiguïté de l'expérience."⁷

"(...) la physique doit être considérée (...) comme le développement des méthodes destinées à ordonner et étudier l'expérience humaine. A ce sujet, notre tâche doit être de rendre compte d'une telle expérience de manière indépendante du jugement subjectif individuel et, par conséquent, objective en ce sens qu'elle peut être communiquée sans ambiguïté dans le langage humain courant."⁸

Nous pouvons résumer les citations précédentes en quelques lignes: Le but de la science est d'augmenter et d'ordonner l'expérience humaine communicable. Une expérience scientifique n'est qu'une situation où nous pouvons dire à autrui ce que nous avons fait et ce que nous avons appris; par conséquent, la communication doit se faire sans ambiguïté. "Communicable" veut donc dire "communicable sans ambiguïté". Et quand la communication est non ambiguë, il n'y a pas de référence explicite à un observateur individuel et, en conséquence, l'information transmise est objective.

1.2 OBJECTIF EST POUR BOHR SYNONYME DE NON-AMBIGU

La plupart des expériences humaines ne sont que partiellement communicables. Nous avons des expériences peu communicables, voire même pratiquement incommunicables. En général, la communication d'une expérience humaine ordinaire est remplie d'imprécisions, d'obscurités, d'ambiguïtés. Dans un compte rendu ordinaire de faits, il existe des aspects qui font référence à des observateurs individuels, que ce soit ceux qui sont impliqués dans les faits rapportés ou celui qui fait le récit. Les états d'âme, les opinions personnelles, les sentiments, les croyances de ces individus sont ordinairement impliquées et la narration dépend en grande partie de ces facteurs purement subjectifs. Si plusieurs individus observent les mêmes faits, ceux-ci seront décrits d'une façon différente en général, et dépendante de l'observateur qui les rapporte. Nous ne pouvons donc pas dire qu'un compte rendu ordinaire des faits soit objectif, vu qu'il dépend des facteurs individuels, c'est - à - dire subjectifs. Par communication objective d'une expérience on entend une communication dans laquelle ces facteurs purement subjectifs ont été éliminés.

Une expérience scientifique, doit être, elle, totalement communicable. En effet, elle doit être reproductible, et pour ce faire il faut qu'elle soit transmise sans ambiguïté, sans référence aucune à un observateur individuel, autrement dit, qu'elle soit exempte de subjectivité.

Nous voyons donc que les considérations de Bohr sur ce qui doit être pris comme description objective de l'expérience sont justifiées.

1.3 LA SCIENCE COMME COMMUNICATION

Il est évident que la science est avant tout, chez Bohr, une affaire de communication. Cela explique, face aux difficultés conceptuelles présentées par les phénomènes quantiques, son insistance à considérer soigneusement les conditions qui permettent l'usage non-ambigu de chaque concept. Pour lui, le problème de l'interprétation du formalisme quantique sera un problème de description; il s'agira de trouver l'usage correct, c'est-à-dire non-ambigu, de chaque mot. Cette manière d'aborder les paradoxes quantiques a fait de Bohr, comme le note A. Shimony,

⁷ E, p.7

⁸ E, p.10

"(...) l'un des écrivains les plus remarquables sur le thème de la pragmatique du langage dans le domaine des sciences exactes."⁹

Nous essayerons, à travers l'analyse de la pensée de Bohr, de mettre en relief sa contribution à cette partie de la théorie du langage que l'on nomme pragmatique, et qui peut être définie très simplement comme l'étude de l'usage du langage.

1.4. LA SCIENCE S'OCCUPE, SELON BOHR, EXCLUSIVEMENT DE L'EXPERIENCE HUMAINE COMMUNICABLE

Il faut remarquer que tous les scientifiques, et en particulier les physiciens, admettraient la caractérisation que Bohr fait de la science, au moins en tant que méthodologie. Des scientifiques réalistes comme Einstein considèrent, néanmoins, qu'à travers l'étude de l'expérience humaine communicable, il est possible de découvrir les concepts qui décrivent la réalité en soi. Ceux-ci seront exprimés, en physique, sous une forme mathématique. Une telle position est celle que d'Espagnat qualifie de *réalisme physique* ou *réalisme mathématique*...¹⁰ Ce n'est pas la position de Bohr, pour qui le but *exclusif* de la science est l'étude de l'expérience humaine communicable, l'étude de ce que l'on peut dire sur la nature et non pas de sa réalité en soi. Bohr dit à ce propos :

"(...) dans notre description de la nature, le but n'est pas de dévoiler l'essence du phénomène, mais seulement de rechercher, aussi loin que possible, des rapports entre les multiples aspects de notre expérience."¹¹

Petersen attribue à Bohr les phrases suivantes:

"Il n'est pas correct de penser que la tâche de la science est de découvrir de quoi est faite la nature. La physique s'occupe de ce que l'on peut dire de la nature."¹²

Comme point de comparaison, il est également utile de présenter une citation d'Einstein, qui, comme nous l'avons dit, soutient une position réaliste en ce qui concerne le but de la science:

"La croyance en un univers externe indépendant du sujet qui perçoit est la base de toutes les sciences naturelles."¹³

Il faut préciser dès maintenant, que Bohr n'arrive pas à la conclusion précédente sur le but exclusif de la science d'une manière *à priori*, en partant de considérations purement philosophiques. Il existe, bien entendu, des choix métaphysiques dans sa pensée, et nous essayerons de les cerner, mais c'est surtout sur la base des connaissances expérimentales de la physique, des données précises de la science, que Bohr confirme ses intuitions, et en particulier celles qui concernent la réalité.

Etant donné que Bohr ne considère pas comme but de la science la description d'une réalité en

⁹ Shimony, A; "Physical and Philosophical Issues in the Bohr - Einstein debate" dans Feshbach, H.; Matsui, T.; Oleson, A.; Ed. **Niels Bohr: Physics and the World** (Harwood Academic Publishers, 1988) Voir aussi: Zinkernagel, P.; **Conditions for Descriptions**. (Routledge & Kegan Paul, London. 1961) et Petersen, A; **Quantum Physics and the Philosophical tradition**. (M.I.T. Press, Cambridge MA. 1.968).

¹⁰ d'Espagnat, B; **Une Incertaine Réalité**, (Gauthier-Villars, Paris, 1985) Chap. 1.

¹¹ Bohr, N; **Atomic Theory and the Description of Nature** (Cambridge University Press, 1934) p.18 (II sera désigné par A)

¹² Petersen, A; "The Philosophy of Niels Bohr" **Bulletin of the Atomic Scientist** 19, 8-14 (1963) p. 12

¹³ Einstein, A; **Ideas and Opinions** (Laurel Edition, Dell Publishing Co., Inc., New York, 1.973) p.260

soi, il convient de se demander sur quelle base il définit l'objectivité scientifique.

Il est évident que Bohr ne se réfère pas à une réalité indépendante pour définir l'objectivité. Une telle référence permettrait de considérer comme objectives les seules affirmations qui font allusion à cette réalité en soi, c'est-à-dire, celles qui n'impliquent pas, même d'une façon implicite, l'observateur et, plus précisément, l'aptitude ou l'inaptitude des observateurs. La seule possibilité qui subsiste est, donc, d'adopter comme critère d'objectivité, *l'accord intersubjectif entre ceux qui communiquent*.

d'Espagnat a précisé très clairement ces deux définitions possibles d'objectivité en appelant *objectivité forte*

"(...) le fait, pour un énoncé, de ne comporter aucune référence, fut-elle implicite, à la collectivité des observateurs."¹⁴

Par contre, *l'intersubjectivité* ou *objectivité faible* sera le fait que les énoncés:

"(...) peuvent en vérité, comporter la mention de l'observateur étant bien entendu qu'ils sont considérés comme vrais pour n'importe quel observateur."¹⁵

Ces deux objectivités impliquent deux réalités appelées par d'Espagnat réalité indépendante et réalité empirique¹⁶ et que nous pouvons aussi appeler réalité forte et faible, expressions qui seront utilisées dans la suite de ce travail.

La *réalité forte* est la réalité dont l'existence ne dépend pas de celle de l'homme, le réel en soi. Elle existerait même si n'existait aucun être humain.

La *réalité faible* est la réalité empirique; la réalité sensible, l'ensemble des phénomènes, au sens philosophique du terme.

Nous aborderons maintenant la question de savoir si une position tentant de dépasser le positivisme pur en acceptant, ou en impliquant, l'existence d'une réalité faible ne conduit pas obligatoirement au réalisme.

Nous devons rappeler que dans la pureté de sa doctrine le positiviste de principe peut affirmer qu'il n'y a que des perceptions et des concepts. Que si ces derniers ne sont pas tous liés de façon directe aux perceptions, ils sont néanmoins des maillons permettant de lier des perceptions actuelles à des perceptions futures. L'accord intersubjectif, la régularité des perceptions sont des faits que nous devons accepter sans problème. Parler d'une réalité extérieure qui serait l'origine des perceptions et se demander si cette réalité est en soi ou non, cela, en fin de compte, n'a pas de sens. On peut choisir le "cadre des phénomènes" ou le "cadre des choses"¹⁷ pour ordonner les perceptions, mais cela ne sera qu'une convention. La science ne décrit que les perceptions et ne donne que des recettes pour prédire des perceptions futures à partir des perceptions actuelles.

Il est connu qu'une telle position conduit facilement au solipsisme, car - conclusion logique

¹⁴ Réf. (10), p.31

¹⁵ Réf. (10), p.31

¹⁶ Réf. (10)

¹⁷ Carnap, R.; "Empiricism, Semantic and Ontology" dans **Philosophy of Mathematics** Benacerraf. P and Putnam, H, ed. (Cambridge University Press, Cambridge 2 ed. 1.985)

- je ne peux pas décider si oui ou non je suis le seul existant, étant donné que ce sont uniquement mes perceptions qui ont un sens et que je ne peux rien dire au-delà. Je demeure dans un scepticisme proche du solipsisme.

La question mentionnée auparavant est d'une importance primordiale dans l'étude de la pensée de Niels Bohr. En effet, si le concept de complémentarité peut être considéré comme une notion utile et une solution à ce que Bohr appelle le paradoxe quantique - et si la complémentarité n'était ni l'une ni l'autre elle ne servirait pas ses desseins explicites - il semble qu'il faille en conclure que Bohr va au-delà du positivisme pur et vise d'une certaine manière une réalité extérieure.

Nous soutenons, au rebours de ce que prétendent certains auteurs¹⁸, qu'une telle réalité n'est que faible. Demandons-nous donc si la croyance, même implicite, en une réalité faible, n'implique pas nécessairement l'acceptation de la réalité forte, et, donc si- dans la mesure où Bohr refuse explicitement de donner au mot réalité un sens différent à celui de phénomène, - la pensée de Bohr peut être considérée, enfin, comme totalement cohérente.

La séquence logique que nous construirons à partir des idées de Bohr pour arriver à notre interprétation de l'idée de réalité (faible) implicite que l'on trouve dans les écrits de Bohr est la suivante. Les détails et les arguments sont exposés dans les chapitres 1 à 6.

i) La science, selon Bohr, a pour tâche d'augmenter et d'ordonner l'expérience humaine communicable.

ii) Bohr soutient que le seul langage qui permet une communication sans ambiguïté est le langage courant. Cette exclusivité que Bohr attribue au langage courant, nous l'appellerons *l'unicité du langage courant*.

iii) Selon l'analyse de Bohr, les données expérimentales de la physique montrent l'impossibilité de décrire un "objet" quantique sur la base du langage courant -"objet" entre guillemets, car il n'a pas le même sens qu'en physique classique. La confrontation de ce fait avec la nécessité d'employer le langage courant pour décrire les résultats expérimentaux eux-mêmes, constitue pour Bohr le *paradoxe fondamental de la physique quantique*.

iv) Afin de lever la difficulté précédente Bohr crée *le mode complémentaire de description*. Selon Bohr, les phénomènes quantiques ont un caractère fondamental *d'indivisibilité* qui impose d'abandonner l'idée de l'existence d'un "objet" quantique indépendant des moyens d'observation. L'usage et le sens même d'un concept doivent se définir, dit Bohr, dans le contexte d'un phénomène précis. Ils ne peuvent pas être définis indépendamment du phénomène total en question, y compris l'instrument d'observation. Il existe, argumente Bohr, des expériences mutuellement exclusives qui définissent des concepts, à leur tour, mutuellement exclusifs mais, cependant, nécessaires pour épuiser toute l'information possible sur un "objet" quantique. Il les appelle des concepts complémentaires. Bohr conclut que l'indivisibilité implique que nous devons abandonner l'idée de la description d'une réalité en soi comme but final de la science.

Il est nécessaire de souligner ici que Bohr n'a pas défini dans ses écrits le sens précis à donner au mot "objet" dans un phénomène quantique. Cette circonstance pourrait nous donner à penser que, par ce mot, Bohr veut signifier la réalité en soi, mais dans un sens

¹⁸ Voir par exemple Folse, H.J.; **The philosophy of Niels Bohr**. (North Holland, Amsterdam, Oxford, 1.985)

ontologique différent de celui que l'on trouve en physique classique. Cette impression est renforcée par le fait que pour voir la complémentarité comme un mode de description débordant l'instrumentalisme pur - pour lequel la notion ne serait d'aucune utilité - il faut considérer que des paires de concepts complémentaires doivent se référer au même "objet" pris comme extérieur. Ce fait, joint aux citations de Bohr dans lesquelles celui-ci parle de la Nature, conduit Folse¹⁹ à conclure que par le mot "objet" Bohr veut dire le réel en soi.

Nous argumenterons que, au contraire, l'"objet" de Bohr bien qu'extérieur n'est que faible et proposerons une terminologie précise, à notre avis en accord avec ses idées implicites sur le sujet, qui permettra d'employer le mot en question sans aucun contenu ontologique.

Nous pouvons maintenant dire quelques mots de la question beaucoup plus générale que nous avons mentionnée. Celle de savoir si une position qui tente de dépasser le positivisme pur et vise une réalité faible ne débouche pas nécessairement sur le réalisme.

Dès que l'on tente de s'écarter de l'empirisme pur et dur et de son scepticisme il est difficile de ne pas se poser la question de l'origine de la régularité des phénomènes et de l'accord intersubjectif, et d'éviter l'évocation du réel en soi comme réponse à ces questions. On voit mal comment s'abstenir de considérer la notion d'une réalité en soi, une fois abandonnée l'apparente sécurité du positivisme strict.

On peut pourtant tenter de nier sa pertinence et essayer de construire de façon cohérente une cosmogénèse non-ontologique. C'est, comme on le verra plus loin, ce que suggère Wheeler, selon lequel le monde sensible et l'esprit s'engendreraient mutuellement, sans qu'il y ait besoin de postuler l'existence du réel en soi (voir Chap.8)

Une autre possibilité est de dire que la réalité en soi existe, mais qu'elle est totalement inconnaissable. On peut affirmer aussi que le réel en soi existe et qu'il n'est ni totalement connaissable ni totalement inconnaissable, mais voilé à la raison discursive, ainsi que l'affirme d'Espagnat (voir Chap.8) Finalement, il peut être soutenu avec Bohm que la réalité en soi existe et que la raison humaine peut toujours y avoir directement accès au moyen de la création de nouveaux concepts (voir Chap. 8).

Les quatre positions précédentes sur le réel en soi peuvent être examinées du point de vue de la cohérence de la cosmovision qui en découle. Ce qui, encore une fois, ne paraît, en revanche, pas cohérent c'est, une fois acceptée la notion d'une réalité faible dépassant en quelque manière les pures "recettes", d'afficher un scepticisme total en refusant même de *considérer* la notion de réel en soi. Une telle position, en effet, est très proche de celle qui consiste à dire que le réel en soi est dépourvu de sens. Compte tenu du fait qu'en acceptant la réalité -même faible - des phénomènes, on laisse de côté les arguments de l'empirisme pur soutenant que rien n'a de sens au-delà des seules perceptions, il ne semble pas cohérent de faire appel à ces mêmes arguments à propos de la régularité des phénomènes, de l'accord intersubjectif, et de la réalité en soi comme réponse aux problèmes posés par l'origine de ces deux aspects du réel sensible. On attend une prise de position, même si ce n'est que pour nier l'existence du réel en soi.

L'un des problèmes les plus graves que présente une étude de la pensée de Niels Bohr est le fait que dans ses écrits les questions ontologiques ne sont pas abordées. Il a donné une interprétation de la mécanique quantique qui permet d'éluder les paradoxes sans recourir à une

¹⁹ Réf. (18)

ontologie. Toutes ses références écrites à propos du mot réalité se réfèrent, selon notre analyse, au réel faible. Etant donné son silence sur la réalité forte, on peut seulement *imaginer* les raisons concevables qui expliqueraient ce silence.

On peut conclure, par exemple, qu'il était, au fond, incohérent, mais compte tenu qu'à la suite de cette affirmation - assez forte et hardie à propos d'un esprit de cette ampleur et de cette profondeur - on ne peut rien dire d'autre, cette conclusion semble la moins intéressante.

Une autre possibilité est d'affirmer que la raison du silence de Bohr sur l'ontologie est tout simplement la négation d'une réalité en soi. Cela paraît être la conclusion de Wheeler qui fait partir son programme de cosmogénèse non-ontologique des idées de Bohr pour tenter de leur donner une cohérence manifeste.

Nous pouvons finalement essayer de formuler une cosmovision dans laquelle, sans nier l'existence du réel en soi, il serait possible de s'expliquer le silence de Bohr. Mais, compte tenu de l'absence d'une base historique suffisamment solide, une telle tentative deviendra facilement une simple spéculation.

1.5. UN CRITERE DE SCIENTIFICITE

Nous proposons l'emploi d'un langage dénué d'ambiguïté comme critère de scientificité ou critère de démarcation pour les sciences.

Exiger l'usage d'une langue non-ambigüe permet d'abord de distinguer entre les sciences et des disciplines telles que le mysticisme ou la poésie. Les expériences du mystique et du poète ne sont que partiellement communicables et il leur faut, par conséquent, employer un langage métaphorique dont le sens est en grande partie dépendant du sujet particulier qui reçoit l'information. D'autres expériences telles que les hallucinations et les rêves ne sont guère communicables et même les sentiments ne le sont qu'en partie. Il n'est donc pas possible, au moins avec le langage dont nous disposons aujourd'hui, d'avoir une "science des rêves" ou une "science des sentiments", par exemple. Ici nous devons apporter une précision. En proposant notre critère de scientificité et en reconnaissant la non scientificité de disciplines et d'expériences telles que le mysticisme et la poésie, nous ne prétendons aucunement nier la validité ni l'importance de telles disciplines et expériences. Affirmer d'une expérience humaine qu'elle est au-delà de la possibilité d'une description sans ambiguïté n'est aucunement équivalent à dire qu'elle est sans valeur. La poésie et le mysticisme, bien qu'ils ne soient pas totalement communicables, paraissent néanmoins essentiels à l'homme en tant qu'être humain. Nous voulons dire seulement que toute discipline qui se veut scientifique doit en premier lieu se munir d'un langage non ambigu. Nous n'aborderons pas ici l'étude des caractéristiques des expériences qui, de par leur propre nature, ne peuvent être totalement communiquées, et, en conséquence ne peuvent devenir scientifiques. Tout ce que nous prétendons, c'est affirmer explicitement qu'il y aurait un grave malentendu à voir dans notre critère de scientificité un plaidoyer pour un scientificisme à la fois banal et inutile.

Le seul critère de communicabilité non-ambigüe semble insuffisant. Une science doit s'accorder avec l'expérience. Elle doit prédire et doit pouvoir être confrontée avec ses prédictions. Le critère est donc nécessaire mais il n'est pas suffisant. Par exemple, un philosophe spéculatif peut communiquer ses idées, ses conclusions, et pour tout dire, le fruit de sa réflexion sur le monde dans un langage sans ambiguïté, et cependant, ses constructions, si logiques et systématiques soient-elles, ne seront pas nécessairement scientifiques dans la mesure où elles n'aboutiront pas forcément à des prédictions que l'on peut confronter avec l'expérience.

Tout cela est vrai. Néanmoins, on doit tenir compte du fait que les prédictions scientifiques doivent aussi s'énoncer dans un langage dénué d'ambiguïté. Et c'est pour cette raison que l'on peut dire que l'astrologie, par exemple, n'est pas une science.

Voyons un peu plus en détail cet exemple très démonstratif: Un astrologue peut affirmer qu'il communique son expérience sans ambiguïté, c'est-à-dire, qu'il observe les positions des astres et les dates de naissance des individus; il établit des lors des relations entre ces données objectives, et peut parler de ces relations d'une manière non-ambigüe.

Des arguments comme le précédent, l'astrologue peut nous en présenter beaucoup. Là où il s'écarte des scientifiques, c'est par la façon dont il énonce ses prédictions. En effet, celles-ci sont présentées dans une langue ambiguë qui empêche d'arriver à un accord entre ceux qui les lisent ou les écoutent. Ces prédictions ne pourront être revendiquées comme correctes qu'en expliquant, après coup, leur vrai sens caché. Mais l'essence d'un énoncé sans ambiguïté est précisément de n'avoir aucun sens caché. C'est le cas des énoncés scientifiques. Il n'y a aucun sens caché dans une prédiction scientifique.

De l'analyse précédente nous pouvons conclure que le critère de non-ambiguïté dans le langage est un critère de scientificité très général dans la mesure où il constitue une condition *sine qua non* de la science. Il faut remarquer que ce critère est plus général que ceux des positivistes et des faillibilistes: que l'on considère que les preuves expérimentales permettent de décider entre la vérité ou fausseté d'une théorie - c'est-à-dire que la science donne des certitudes - ou que l'on soutienne qu'une théorie peut seulement être falsifiable -c'est-à-dire que la science ne produit pas de certitudes - il est nécessaire d'admettre d'abord que la théorie et ces prédictions doivent être énoncées dans un langage dénué d'ambiguïté.

1.6. LA SCIENTIFICITE D'UNE ETUDE SUR LES INTERPRETATIONS DE LA MECANIQUE QUANTIQUE

Nous aborderons ici la question de la scientificité des études sur l'interprétation de la mécanique quantique, sur l'idée de complémentarité, sur la relation entre science et langage, etc.

Etant donné que de telles études ne débouchent pas nécessairement sur des prédictions expérimentales, peut-on dire d'emblée qu'elles ne sont pas scientifiques?

Que pourrait-on dire aussi du cas hypothétique d'une théorie qui unifierait la physique sans conduire à aucune prédiction expérimentale nouvelle?²⁰

La portée de la science n'est-elle pas plus large qu'on ne le pense généralement?

Les réponses à ces questions ne sont aucunement évidentes.

Néanmoins, en ce qui concerne l'étude de la relation entre science et langage - et nous essayerons de montrer dans cette thèse qu'une recherche sur les diverses interprétations de la mécanique quantique est une étude de cette sorte - il s'agit d'un faux problème. En effet, ces études portent sur les conditions mêmes permettant de faire de la science. En ce sens on pourrait dire qu'il s'agit d'études scientifiques.

²⁰ Exemple hypothétique présenté par d'Espagnat dans la préface de **Conceptual Foundations of Quantum Mechanics** 2nd. ed. (W.A.Benjamin, Inc. London 1976)

On ne peut demander à ce type de démarches d'avoir un sens vérifiable par l'expérience, puisqu'il s'agit d'une étude des conditions mêmes qui donnent le sens.

On ne peut non plus exiger le critère de vérifiabilité pour cette sorte de recherche puisqu'elle s'occupe de clarifier les conditions qui permettent l'existence de ce critère.

Nous pouvons, peut-être, comprendre dans ce sens une phrase prononcée, selon Petersen, par Bohr au sujet de la relation entre langage et réalité, et plus précisément sur le problème de savoir quel est, des deux, le plus fondamental, et si la réalité est, pour ainsi dire, sous-jacente au langage.

Voici la réponse de Bohr:

"Nous sommes suspendus dans le langage de telle manière que nous ne pouvons pas dire ce qui est en haut et ce qui est en bas".²¹

²¹ Réf. (12), p.11

CHAPITRE 2

LE ROLE DU LANGAGE COURANT

Dans le chapitre précédent, nous avons vu que, pour Bohr, un critère très général de scientificité était l'emploi d'un langage dénué d'ambiguïté. On peut se demander quel sera ce langage.

Sera-t-il celui des mathématiques, étant donné que celles-ci constituent un langage précis et non-ambigu? Ou bien sera-t-il possible d'avoir plusieurs langages dénués d'ambiguïté?

2.1. LE LANGAGE COURANT: LE SEUL DENUÉ D'AMBIGUÏTÉ

La réponse de Bohr aux questions précédentes est très claire et nous pouvons la trouver dans les citations suivantes:

"(...) le but de toute expérience de physique est d'obtenir des connaissances dans des conditions reproductibles et communicables, ce qui ne nous laisse pas d'autre choix que de nous servir des concepts de la vie journalière - raffinés par la terminologie de la physique - lorsque nous avons à décrire, non seulement les instruments de mesure et leur fonctionnement, mais encore les résultats mêmes des expériences."²²

"(...) aussi loin que les phénomènes puissent transcender la portée des explications de la physique classique, la description de tous les résultats d'expérience doit être exprimée en termes classiques. La raison en est simple: par le mot d'"expérience" nous nous référons à une situation où nous pouvons dire à d'autres hommes ce que nous avons fait et ce que nous avons appris, il en résulte que la description du dispositif expérimental et des résultats des observations doit être exprimée en un langage dénué d'ambiguïté, se servant convenablement de la terminologie de la physique classique."²³

"Tout savant, cependant, se trouve constamment devant le problème d'une description objective de l'expérience, ce qui, pour nous, n'est rien d'autre qu'une communication sans ambiguïté. Notre instrument de base est évidemment le langage ordinaire qui sert aux besoins de la vie pratique et des relations sociales. Nous ne nous intéresserons pas ici aux origines du langage mais à sa portée pour la communication scientifique (...)"²⁴

"Comme le but de la science est d'augmenter et d'ordonner notre expérience, toute analyse des conditions de la connaissance doit reposer sur une étude du caractère et de la portée de nos moyens de communication. Notre base est évidemment le langage qui a été développé pour nous orienter dans le monde qui nous environne et pour organiser les communautés humaines."²⁵

Il convient maintenant de se demander quels sont les éléments du langage courant que Bohr considère comme indispensables pour une communication exempte d'ambiguïté.

²² P, p. 37

²³ P, p.58

²⁴ P, p.101

²⁵ P, p. 133

On trouve la clef de cette question dans bon nombre de ses propres affirmations explicites au sujet du langage ordinaire:

"(...) tout compte rendu des expériences physiques est (...) finalement fondé sur le langage courant, adapté à l'orientation dans notre entourage et à l'établissement des rapports entre cause et effet."²⁶

"Le mode causal de description a des racines profondes dans nos efforts conscients pour utiliser l'expérience à des fins d'adaptation pratique à notre environnement, et de cette façon il est incorporé de manière inhérente au langage courant. Le guide que l'analyse en termes de cause et effet a fourni dans plusieurs domaines de la connaissance humaine, a fait que le principe de causalité en arrive même à s'établir comme idéal de l'explication scientifique."²⁷

"La description de l'expérience ordinaire présuppose la divisibilité sans restriction du cours des phénomènes dans l'espace et le temps et la liaison de toutes les étapes en une chaîne ininterrompue en termes de causes et d'effets."²⁸

On peut donc conclure que les éléments du langage courant nécessaires pour rendre compte de toute expérience physique objective sont, selon Bohr: la localisation dans l'espace et le temps et la causalité.

Il faut préciser que par causalité, Bohr entend le déterminisme de la physique classique. Ce point, on le trouve bien exprimé dans la citation suivante:

"La description causale est fondée supposition que la connaissance de l'état d'un système à un instant donné permet la prédiction de son état à un instant postérieur."²⁹

Il faut que nous parlions maintenant de la relation qui existe entre la causalité et la séparabilité classique entre le sujet observateur et l'objet observé. Bohr a mis l'accent sur cette séparabilité qu'il considère comme fondamentale dans la conception classique de la nature:

"Cette hypothèse, (...qu'il est possible de faire une distinction nette entre le comportement propre des objets et les instruments d'observation...) constitue la base de la physique classique."³⁰

"La distinction entre le sujet et l'objet était fixée dans la conception mécaniste de la nature (...)"³¹

Nous venons de dire que pour Bohr la causalité équivaut au déterminisme, lequel consiste à soutenir que la connaissance de l'état d'un système en un temps donné permet de prédire l'état en un temps postérieur. Néanmoins, pour connaître l'état d'un système, il faut interagir avec

²⁶ E, p. 1

²⁷ Bohr, N; "On the Notions of Causality and Complementarity". **Science**. Vol.111 January 20, 1950 p. 51-54.

²⁸ E, p.59

²⁹ Réf.(27)

³⁰ P, p.37

³¹ P, p.138

lui et, par conséquent, il faut le perturber. En physique classique on admet qu'il est toujours possible, en principe, de compenser la perturbation ou, autrement dit, que l'on peut toujours connaître ou définir cette perturbation. Dans cette physique nous pouvons donc considérer que le sujet est essentiellement séparé de l'objet.

Notons par ailleurs que le fait que le déterminisme ne soit pas valable n'implique pas nécessairement l'impossibilité de faire une séparation entre sujet et objet. En effet, l'on peut concevoir l'existence d'un indéterminisme intrinsèque, d'un hasard "vrai", c'est-à-dire que l'on peut considérer les lois de la nature comme essentiellement statistiques, de sorte que même s'il est possible de définir et de compenser la perturbation de l'objet produite par l'observation, on ne peut prédire que les probabilités intrinsèques des événements donnés.

Par contre, si la séparabilité entre sujet et objet n'est pas soutenable, il est impossible de définir la perturbation de l'objet et, en conséquence, le déterminisme devient, dans la conception de Bohr, une thèse peu soutenable. Nous parlerons davantage de la réfutation, par Bohr, du déterminisme au chap.3.

Les considérations précédentes sont d'un intérêt fondamental. En effet, l'une des conclusions les plus importantes auxquelles arrive Bohr, après s'être convaincu de l'impossibilité dans le domaine quantique d'une séparation stricte entre l'objet et l'instrument avec lequel il est observé, est précisément que la loi de la causalité n'est pas soutenable dans les phénomènes quantiques. Bohr considère que le phénomène quantique est une *totalité indivisible* qui comprend à la fois l'objet et l'instrument et que l'on ne peut ni parler des propriétés en soi de l'objet ni conserver la conception classique de la réalité physique.

Il est remarquable de constater comment cette intuition de Bohr est corroborée par les développements récents qui ont vu le jour à la suite du théorème de Bell. Nous parlerons en détail de la relation entre ce que nous pouvons appeler la *totalité* ou *l'indivisibilité* de Bohr et *l'inséparabilité* au chapitre 5.

Nous devons maintenant clarifier deux points qui concernent les idées précises de Bohr sur la non-ambiguïté du langage courant:

1) La première remarque est qu'il ne faut pas croire que pour Bohr le langage courant, tel qu'il est, se présente dénué d'ambiguïté. Bohr opte plutôt pour le fait que bien que le langage ordinaire soit rempli d'ambiguïtés, il est possible, néanmoins, de trouver un *usage* non ambigu de ce dernier. Il s'agit de déterminer sans ambiguïté les circonstances qui permettent l'emploi de chaque mot, plutôt que de définir d'une façon précise chaque vocable. C'est la pragmatique du langage qui va donner cette possibilité de lui enlever l'ambiguïté.

Les paroles suivantes, qui auraient été prononcées par Bohr selon Heisenberg, illustrent d'une manière assez claire les considérations que nous venons de présenter:

"Nous savons, bien sûr, que les concepts que contient ce langage (celui de la physique classique) sont imprécis, qu'ils ne comportent qu'un domaine d'application limité; mais nous dépendons de ce langage, et - après tout - il nous permet de comprendre les phénomènes au moins indirectement".³²

"En effet, le langage a bien ce caractère flottant. Nous ne savons jamais exactement ce qu'un mot signifie; et le sens de ce que nous disons dépend de la

³² Heisenberg, W; **La Partie et le Tout** (Albin Michel, Paris, 1972) p. 180

relation entre les mots à l'intérieur de la phrase, du contexte où la phrase est prononcée, ainsi que d'innombrables autres circonstances que nous ne pouvons pas citer toutes. Si un jour tu lis les écrits du philosophe américain William James, tu verras qu'il a extrêmement bien décrit cet état de choses. Il souligne que, pour chaque mot que nous entendons dire, un sens particulièrement important du mot apparaît certes en pleine clarté dans notre conscience, mais que d'autres significations se manifestent également dans une sorte de clair-obscur où elles viennent se glisser; que des liens s'établissent également avec d'autres concepts, et que les effets s'en font sentir jusque dans notre inconscient. Ceci est vrai dans le langage usuel, a fortiori dans celui des poètes. Et jusqu'à un certain point, cela concerne aussi le langage de la science. En physique atomique précisément, la nature vient à nouveau de nous apprendre combien peut être restreint le domaine d'application de notions qui nous paraissaient auparavant entièrement déterminées et non problématiques. Il suffit, par exemple, de penser à des notions comme 'position' et 'vitesse'.

Mais, d'un autre côté, bien entendu, il faut souligner la grande découverte faite par Aristote et les anciens Grecs, à savoir que l'on pouvait idéaliser et préciser le langage au point de rendre possible des chaînes de déductions logiques. Un tel langage précis est beaucoup plus restreint que le langage ordinaire, mais pour la science il est d'une valeur inestimable.

Les positivistes ont sans doute raison lorsqu'ils soulignent très fortement la valeur d'un tel langage et lorsqu'ils nous mettent en garde contre le risque qui se présente lorsque nous quittons le domaine de la formulation logiquement précise, à savoir que le langage peut alors perdre son contenu. Mais peut-être ne se rendent-ils pas compte que, dans la science, nous pouvons tout au plus approcher de l'idéal ainsi défini, mais nous ne pouvons pas l'atteindre. Car déjà le langage par lequel nous décrivons nos expériences contient des concepts dont nous ne pouvons pas indiquer exactement le domaine d'application."³³

"(...) dans notre langage, nous disposons de concepts flous et d'une logique restreinte, par des limitations mal définies, en ce qui concerne son domaine d'application; et néanmoins, avec tout cela, nous réussissons à apporter une certaine clarté dans notre compréhension de la nature."³⁴

D'autres citations de Bohr montrent que c'est à travers la pragmatique qu'on peut arriver à supprimer l'ambiguïté dans le langage courant:

"En physique classique (...) la description est fondée sur des images et des idées propres au langage courant (...). L'exploration de nouveaux champs de l'expérience physique a, néanmoins, révélé des limitations insoupçonnées dans cette approche et a demandé une révision radicale des fondements de *l'application sans ambiguïté de nos concepts* les plus élémentaires (...)." ³⁵

Bohr parle de la nécessité de se référer:

"(...) aux conditions nécessaires à un *usage non- ambigu des concepts* d'espace et de

³³ Réf.(32) p. 187 - 188

³⁴ Réf. (32) p. 190

³⁵ Bohr N; "Physical Science and the Study of Religion", dans *Orientalia Ioni Pedersen Septuagenario* (Einer Munksgaard, 1.953) p.385-390 (Souligné par J.R.CH.)

temps, d'une part et des lois dynamiques de conservation de l'autre."³⁶

En parlant de l'application de l'idée de complémentarité en psychologie, Bohr considère des mots tels que "instinct" et "raison" et admet qu'on peut donner à ces mots bien des sens.

Nonobstant:

"(...) ce qui nous intéresse ici, c'est seulement *l'usage pratique* que nous faisons *de ces mots*, dans le but de distinguer les diverses situations où peuvent se trouver les animaux et les hommes."³⁷

On peut trouver, en effet, plusieurs endroits dans les essais de Bohr dans lesquels il se réfère à l'usage du langage:

"La nécessité en physique atomique, de reconsidérer les fondements sur lesquels doit reposer *l'usage non ambigu des idées* physiques élémentaires, rappelle (...) la situation qui avait conduit initialement Einstein à réviser les bases de *toute application* des concepts spatio-temporels (...)"³⁸

"De nos jours, l'exploration de nouveaux champs d'expérience a révélé des conditions insoupçonnées préalables à toute *application non-ambiguë de nos concepts* les plus élémentaires."³⁹

"La tâche que la découverte de Planck posait aux physiciens n'était rien moins que d'analyser à fond les hypothèses sur lesquelles repose *l'application de nos concepts* les plus élémentaires."⁴⁰

2) La deuxième remarque est que, pour Bohr, ce n'est pas uniquement le langage de la physique classique - lui-même, raffinement du langage courant - qui peut s'employer sans ambiguïté. Tout le langage ordinaire - y compris des mots qu'on n'utilise pas dans la physique classique tels que: autoreproduction, finalité, téléologie, conscience, raison, instinct - peut être dépouillé de toute ambiguïté si l'on parvient à préciser suffisamment les circonstances dans lesquelles on fait l'usage de chaque vocable.

Ce point est très important pour comprendre les suggestions de Bohr pour une extension de la complémentarité dans des domaines autres que la physique.

2.2 LA NATURE DES MATHÉMATIQUES

Les considérations de Bohr sur la nature des mathématiques sont étroitement liées à ses idées au sujet du langage. A son avis, les mathématiques doivent être considérées comme un raffinement du langage courant:

"Cependant nous ne considérons pas, dans notre discussion, les mathématiques pures comme une branche séparée de la connaissance, mais plutôt comme un raffinement du langage commun auquel elles fournissent les moyens appropriés d'énoncer des relations

³⁶ P, p. 60 (Souligné par J.R.CH.)

³⁷ P, p.40 (Souligné par J.R.CH.)

³⁸ P, p.60 (Souligné par J.R.CH.)

³⁹ P, p.103 (Souligné par J.R.CH.)

⁴⁰ P, p. 128 (Souligné par J.R.CH.)

pour lesquelles l'expression verbale ordinaire est imprécise ou incommode."⁴¹

"(...) il est important de s'apercevoir que la définition des symboles et des opérations mathématiques est fondée sur un usage logique et simple du langage courant. Les mathématiques ne doivent donc pas être considérées comme une branche spéciale de la connaissance fondée sur l'accumulation de l'expérience, mais plutôt comme un raffinement du langage général, auquel elles suppléent avec des outils aptes à représenter des relations pour lesquelles l'expression verbale ordinaire est imprécise ou incommode."⁴²

Avant de présenter une série de commentaires à propos de la relation entre les théories les plus connues dans la philosophie des mathématiques et les opinions de Bohr à ce sujet, disons que son refus d'attribuer une réalité physique à la fonction d'onde Ψ - ce qui lui permet d'éviter des paradoxes comme celui de la mesure - est très cohérent avec ses idées sur les mathématiques.

Nos commentaires consisteront en une comparaison très sommaire entre les considérations de Bohr sur la nature des mathématiques et les théories actuelles dans ce domaine. Notre intention n'est pas d'examiner profondément ces questions, ce qui nous éloignerait beaucoup du sujet principal de cette thèse, mais plutôt de remarquer quelques points intéressants susceptibles d'être approfondis dans une recherche ultérieure.

Il existe aujourd'hui traditionnellement trois points de vue importants sur la nature des mathématiques: Le logicisme, l'intuitionnisme et le formalisme. Nous donnerons un très bref aperçu de chacun d'eux en les comparant au point de vue de Bohr.⁴³

2.2.1. Le logicisme (Russell - Whitehead)

C'est la thèse selon laquelle les mathématiques constituent une extension de la logique, c'est-à-dire qu'elles ne sont rien d'autre qu'une partie de celle-ci.

Plus concrètement, les partisans du logicisme soutiennent que les concepts mathématiques dérivent des concepts logiques au moyen de définitions explicites, et que les théorèmes de la mathématique peuvent être obtenus à partir des axiomes logiques en faisant usage de déductions purement logiques elles-mêmes.

Pour Bohr, les mathématiques ne font pas partie de la logique, elles font plutôt partie du langage; plus précisément, elles constituent un raffinement du langage courant obtenu par un *usage logique* de celui-ci.

2.2.2. L'intuitionnisme (Brouwer - Heyting)

Selon la thèse de l'intuitionnisme, la série des nombres entiers naturels dérive de *l'intuition* que nous avons de la succession temporelle des instants de notre expérience. C'est une intuition *a priori*, antérieure à toute logique. Elle est aussi essentiellement une activité de la pensée

⁴¹ P, p. 102

⁴² E, p. 9

⁴³ Pour mieux connaître les trois points de vue nommés voir la collection d'essais originaux fait en : **Philosophy of Mathematics**, P. Benacerraf et H. Putnam Ed. (Cambridge University Press, 1985)

et la même pour tous les êtres pensants. Comme l'édifice mathématique repose finalement sur l'arithmétique, il en résulte que les mathématiques sont le produit d'une activité de l'esprit.

Pour le partisan de l'intuitionnisme, les mathématiques doivent être considérées comme une fonction naturelle de l'intellect. Le mathématicien fait usage du langage - aussi bien le courant que le formalisé - pour communiquer ses idées mathématiques, mais le langage ne constitue ni les mathématiques ni une représentation des mathématiques. Celles-ci sont indépendantes du langage.

La différence entre la thèse de Bohr et l'intuitionnisme est évidente.

2.2.3. Le formalisme (Hilbert)

L'idée centrale du formalisme est que la mathématique est la discipline des systèmes formels. Le concept fondamental en mathématique est donc celui de système formel.

Dans le langage courant, aussi bien que dans les raisonnements mathématiques non formalisés, aucun concept ne possède un sens parfaitement défini; il y a toujours ambiguïté, laquelle est d'autant plus grande que le concept est plus abstrait. La seule manière d'obtenir une rigueur totale est d'abstraire tout le sens des énoncés mathématiques et de les considérer uniquement comme une séquence de signes, en négligeant toute signification qu'ils peuvent avoir. De cette façon, il est possible de formuler des règles définitives pour la déduction des nouveaux énoncés à partir de ceux déjà connus et d'éviter l'incertitude qui résulte de l'ambiguïté du langage.

Il n'est pas possible de fonder les mathématiques sur la seule logique, car certains concepts mathématiques extra-logiques, comme le concept d'ensemble ou le concept du nombre cardinal sont indispensables pour exposer les lois logiques elles-mêmes. C'est le signe et la manière de s'en servir, c'est-à-dire la formalisation, qui sont à la base des mathématiques.

Il n'est pas évident qu'une approche comme celle du formalisme ne puisse être cohérente avec la thèse de Bohr. Nous pouvons, en effet, imaginer un processus tel que celui-ci:

On commencerait avec des relations simples formulées dans le langage courant et on continuerait en obtenant chaque fois des relations de plus en plus complexes et abstraites. Finalement, en privant de sens les entités entre lesquelles il y a les relations, on obtiendrait une séquence de signes et une série de règles de déduction -c'est-à-dire une formalisation - qui pourraient devenir suffisamment rigoureuses pour être considérées comme une partie des mathématiques.

Etant donné que l'intention ne serait pas d'obtenir une rigueur totale, car les mathématiques ne seraient à la fin qu'une partie du langage courant et que celui-ci est essentiellement ambigu, on ne rencontrerait pas les problèmes auxquels se heurte la thèse du formalisme avec des résultats comme ceux des théorèmes de Gödel sur l'impossibilité de prouver la non- contradiction de toute théorie contenant l'arithmétique.

En dernier lieu il faut souligner la réponse qu'on peut trouver dans les idées de Bohr sur la nature des mathématiques à des questions comme celle de la relation entre les mathématiques et la réalité physique. Selon la thèse de Bohr, le problème se réduirait à celui du rapport entre le langage et la réalité, et la solution à ce dernier problème résoudrait celui de l'accord entre les mathématiques et la réalité.

2.3 L'UNICITE DU LANGAGE COURANT

L'un des aspects les plus fondamentaux de la pensée de Bohr est sa thèse selon laquelle le langage courant non seulement permet d'arriver à la non-ambiguïté mais est le *seul* langage que nous possédons (et que nous posséderons jamais) que nous puissions parvenir à employer sans ambiguïté. Cette thèse nous l'appellerons *l'unicité du langage courant*. L'importance de cette idée dans la pensée de Bohr vient du fait qu'à partir des considérations sur la non-validité du langage ordinaire dans les phénomènes quantiques, Bohr en vient à considérer le quantum d'action et ses propriétés comme quelque chose à accepter sans aucune interprétation additionnelle possible. Et ces propriétés du quantum d'action l'amènent finalement à sa conception de la réalité physique.

Aussi important qu'il soit, ce point n'a malheureusement pas été justifié d'une manière totalement convaincante par Bohr. On peut même soutenir qu'il ne l'a justifié d'aucune manière et que, comme le note von Weizsäcker, qui a connu longuement Bohr:

"(...) Bohr était essentiellement dans le vrai, mais il ne savait pas pourquoi (...)"⁴⁴

Etant donné l'importance de ce point il est nécessaire d'analyser plus en détail les lignes dans lesquelles Bohr parle de l'unicité du langage courant.

Il faut montrer, d'abord que pour Bohr, le langage classique restera toujours celui des physiciens:

"Nous devons, en effet prendre conscience que l'interprétation sans ambiguïté de toute mesure doit être essentiellement exprimée par des termes de théories physiques classiques et nous devons dire, en ce sens, que le langage de Newton et de Maxwell restera le langage des physiciens pour toujours."⁴⁵

"Bien que nous devons nous préparer, de nouveau, à une renonciation additionnelle à la visualisation ordinaire, les concepts fondamentaux de la physique que nous devons aux grands maîtres (Newton, Maxwell) continueront sûrement à être indispensables dans ce nouveau champ (celui de la constitution interne du noyau atomique)."⁴⁶

La question suivante, d'après Heisenberg, avait été posée directement à Bohr: Sera-t-il possible, une fois qu'on aura compris dans sa totalité la théorie de la mécanique quantique, de renoncer aux concepts classiques et de développer un langage nouveau qui décrive de manière plus adaptée les phénomènes atomiques? Voici la réponse de Bohr:

"Cela n'est pas du tout notre problème (...) la science consiste à observer les phénomènes et à communiquer le résultat à d'autres, afin qu'ils puissent le contrôler. Ce n'est qu'une fois que l'on s'est mis d'accord sur ce qui s'est produit objectivement ou se reproduit objectivement de façon régulière, qu'il existe une base de compréhension. Et tout ce processus d'observation et de communication s'effectue en fait au moyen de concepts de la physique classique (...) Cela fait partie des bases fondamentales de notre

⁴⁴ Weizsäcker, C. F. von; dans **Quantum Theory and Beyond**, Ted Bastin, Ed. (Cambridge University press, 1971) p.25-31

⁴⁵ Bohr, N; "Maxwell and Modern Theoretical Physics", **Nature**, Vol 128, Oct 24 (1931) p.691 - 692

⁴⁶ Réf. (36)

science que nous utilisons, pour parler de nos mesures, un langage ayant essentiellement la même structure que celui employé pour parler des expériences de la vie de tous les jours. Nous avons appris que ce langage ne constitue qu'un instrument très incomplet lorsqu'il s'agit de nous orienter et de communiquer entre nous, néanmoins, cet instrument est une condition fondamentale de notre science."⁴⁷

Voyons maintenant quelles sortes d'arguments présente Bohr pour étayer ses opinions:

"Les obstacles que l'on trouve dans ce chemin (d'adapter nos modes de perception provenant des sensations à la connaissance graduellement approfondie des lois de la nature) tirent leur origine principalement du fait que, pour ainsi dire, chaque mot dans le langage se réfère à nos perceptions ordinaires. Dans la théorie quantique, nous trouvons cette difficulté immédiatement dans la question de l'inéluçabilité de l'aspect d'irrationalité qui caractérise le postulat quantique. J'espère, cependant, que l'idée de complémentarité est adéquate pour caractériser la situation, qui présente une analogie très profonde avec la difficulté générale (qui existe) dans la formation des idées humaines, (et qui est) inhérente dans la distinction entre sujet et objet."⁴⁸

Deux commentaires s'imposent avant de présenter les citations qui vont suivre :

A. Ce que signifie l'expression "l'irrationalité qui caractérise le postulat quantique", Bohr lui-même l'explique de cette manière:

"(...) L'indivisibilité du quantum d'action est, du point de vue classique une irrationalité (...)"⁴⁹

B. La citation provient des premiers essais dans lesquels Bohr met l'accent sur la perception plutôt que sur la communication de l'expérience. Cela explique ses nombreuses références, dans ces essais, à "nos modes de perception", "nos formes de perception" et "nos modes ordinaires de penser".

Continuons, maintenant, avec les paroles de Bohr:

"(...) l'auteur a l'intention de montrer que les difficultés, concernant nos formes de perception, qui surgissent de la théorie atomique à cause de l'indivisibilité du quantum d'action, peuvent être considérées comme un rappel instructif des conditions générales implicites dans la création des concepts humains. L'impossibilité de distinguer selon notre manière habituelle entre les phénomènes physiques et leur observation nous met, véritablement, dans une situation très similaire à celle, assez familière en psychologie, où nous est constamment rappelée la difficulté de distinguer entre sujet et objet. Il peut paraître à première vue qu'une telle attitude à l'égard de la physique pourrait conduire à un mysticisme contraire à l'esprit de la science naturelle. Cependant, nous ne pouvons en aucune manière espérer atteindre une compréhension claire dans la physique sans faire face aux difficultés qui surgissent dans la formation des concepts et dans l'usage des moyens d'expression (...) Ainsi, selon le point de vue de l'auteur, ce serait une conception erronée de croire que les difficultés de la théorie atomique peuvent être éludées par un remplacement éventuel des concepts de la physique classique par de nouvelles formes. Sans aucun doute, comme nous l'avons

⁴⁷ Réf. (32) p.181

⁴⁸ A, p. 10

⁴⁹ A, p. 10

remarqué, la reconnaissance des limitations de nos formes de perception n'implique en aucune manière que nous puissions abandonner nos idées habituelles, au moment où nous ordonnons nos impressions sensorielles. Il est improbable que les concepts fondamentaux des théories physiques deviennent jamais superflus pour la description de l'expérience physique."⁵⁰

"(...) il existe une connexion étroite entre l'échec de nos formes de perception, lequel est fondé sur l'impossibilité de (faire) une séparation stricte entre les phénomènes et les moyens d'observations, et les limitations générales de la capacité humaine à créer des concepts, lesquelles ont leur racines dans notre différenciation entre sujet et objet."⁵¹

On peut résumer ainsi les arguments de Bohr:

i) Il existe deux difficultés

La *difficulté psychologique* de distinguer entre sujet et objet, qui est à l'origine des limitations de la création de concepts et de l'usage des moyens d'expression.

La *difficulté physique* de faire une séparation nette entre les phénomènes atomiques et leur observation, qui est à l'origine de l'échec de nos formes de perception.

ii) Il existe une profonde analogie, une connexion étroite, entre ces deux difficultés et il n'est pas possible d'arriver à une compréhension claire de la difficulté physique sans affronter la difficulté psychologique.

iii) La considération soigneuse des deux difficultés permet de conclure que:

- Il est erroné de croire que l'on peut résoudre la difficulté physique par l'éventuelle création d'un langage nouveau.

- Il est improbable que les concepts de la physique classique en viennent jamais à être superflus dans la description de l'expérience physique.

Pour compléter l'analyse lisons comment Bohr décrit en détail la difficulté psychologique:

"Le problème épistémologique en discussion peut se caractériser brièvement de cette manière: Pour décrire notre activité mentale nous avons besoin, d'une part, d'un contenu objectif donné qui se place en opposition avec un sujet qui perçoit, mais, d'autre part, il est impossible de maintenir une séparation nette entre l'objet et le sujet puisque ce dernier appartient lui-même à notre contenu mental. Il s'ensuit que non seulement le sens de chaque concept, et aussi de chaque mot, est relatif et dépend du choix arbitraire de notre point de vue mais de plus que nous devons nous préparer à accepter le fait qu'une élucidation complète d'un même objet peut requérir divers points de vue irréductibles à une description unique."⁵²

Dans un dialogue entre Bohr et Heisenberg, rapporté par ce dernier, nous pouvons trouver l'esquisse d'un argument additionnel pour l'unicité du langage: Bohr fait une comparaison

⁵⁰ A, p. 16

⁵¹ A, p. 96

⁵² A, p. 96

entre l'instinct et l'intellect et spécule sur l'évolution de l'être humain.

Selon lui, le fait d'avoir une spécialisation moindre à l'environnement par rapport aux animaux, a permis à l'homme de devenir plus adaptable et dans le processus d'adaptation, le développement du langage a été, peut-être, le pas décisif. Heisenberg remarque alors que si l'on continue dans cette façon de penser on pourrait arriver à conclure que des formes différentes d'intellect et de langage, et peut-être de logique aussi, pourraient être apparues dans des endroits différents du monde. Bohr lui répond:

"(...) il peut en effet exister des formes différentes de langage et de pensée, tout comme il existe des races diverses ou des espèces variées d'organismes. Mais de même que tous ces organismes sont tout de même construits à partir des mêmes lois naturelles, en grande partie également à partir de composés chimiques qui sont presque les mêmes, de même les différentes sortes possibles de logique auront pour base certaines *formes fondamentales qui ne sont pas faites par l'homme et qui appartiennent à la réalité tout à fait indépendamment de nous*. Ces formes jouent un rôle tout à fait décisif dans le processus de sélection qui produit le développement de la langue; mais il serait faux d'imaginer qu'elles sont elles-mêmes le résultat de ce processus."⁵³

Nous avons dit au chapitre 1 que dans les écrits de Bohr des questions ontologiques ne sont pas abordées. Il paraît cependant que dans ses affirmations orales il était plus disposé à se référer à ce type de questions. Les phrases que nous avons soulignées dans la citation précédente semblent indiquer, en effet, une référence de Bohr à la réalité en soi pour expliquer l'unicité du langage.

En effet, il dit que les lois naturelles donnent lieu, au moyen du processus de sélection et à partir des mêmes composés chimiques, à la grande diversité des espèces et d'organismes biologiques, et les *formes fondamentales* de la logique, au moyen également d'un processus de sélection, donnent lieu aux diverses langues. Et ces *formes fondamentales* ne sont, selon la citation, ni le résultat de la sélection ni faites par l'homme. Elles sont plutôt *indépendantes de nous, et appartient à la réalité*. Le contexte de la citation indique qu'ici le mot réalité se réfère au réel en soi.

Si les *formes fondamentales* de la logique appartiennent au réel en soi, on peut comprendre pourquoi le langage courant est unique. En effet, si les concepts fondamentaux du langage ne dépendent pas de l'homme alors ce dernier ne peut pas aller au delà de ce langage. L'argument qui, selon le récit de Heisenberg, aurait été esquissé par Bohr, semble indiquer que finalement les formes fondamentales sont des *à priori* pour la description de l'expérience. Cela indiquerait une similitude incontestable avec la doctrine des *à priori* de Kant. Etudions ce point. Afin de donner une réponse au problème de la justification de l'induction posé par Hume, Kant introduit deux sortes d'énoncés: Les énoncés *synthétiques à priori* qui se réfèrent au contenu de la connaissance, et les *énoncés analytiques* qui ne font pas de référence à cette dernière et dont nous pouvons apprécier la validité en considérant les règles qui régissent le langage dans lequel ils sont formulés.

Les énoncés synthétiques à priori:

a) Forment le cadre conceptuel indispensable pour organiser notre expérience.

⁵³ Réf. (32) p. 192 (Souligné par J.R.CH.)

b) Ont une validité absolue et sont définitivement fixés et immuables.

Dans ces énonces on trouve: la causalité, le temps absolu et l'espace galiléen.

Peut-on interpréter les idées de Bohr comme une sorte de kantisme?

Examinons la question:

Premièrement: Si la causalité et la localisation spatio-temporelle sont une partie essentielle du seul langage dont nous disposons pour communiquer l'expérience humaine sans ambiguïté, nous pouvons, certainement, soutenir qu'ils forment le cadre conceptuel indispensable pour organiser l'expérience.

Deuxièmement: Si le langage courant ne devient jamais superflu pour la description de l'expérience humaine, si en conséquence, on ne peut jamais l'abandonner, et si les concepts en question -c'est-à-dire la localisation spatio-temporelle et la causalité -forment toujours partie de celui-ci, nous pouvons dire que ces concepts sont déjà définitivement fixés et immuables.

Il reste à savoir si pour Bohr la causalité et la localisation spatio-temporelle sont des formes *à priori*.

La dernière citation (citation 53) pourrait indiquer que l'une des raisons de Bohr pour affirmer l'unicité du langage serait la croyance en certaines formes fondamentales, indépendantes de l'homme et, par conséquent, indépendantes de l'expérience, c'est-à-dire: *à priori*. La citation semble faire référence à une réalité indépendante de l'homme et qui cependant influencerait sur au moins la structure de son esprit. On pourrait donc soutenir que Bohr est d'une certaine façon kantien.

Nous n'avons pas, malheureusement, une base suffisante pour approfondir cette question puisque dans aucun de ses écrits Bohr ne fait mention d'une espèce d'apriorisme pour justifier sa thèse de l'unicité du langage. A notre connaissance le seul endroit où l'on peut trouver une esquisse d'un argument de type kantien est la dernière citation, qui provient des écrits de Heisenberg.⁵⁴

L'étude d'une éventuelle influence de Kant sur la pensée de Bohr est plus délicate. Non seulement Bohr ne cite jamais Kant dans ses essais mais, comme le note Weizsäcker:

"(...) Bohr semble n'avoir jamais beaucoup lu de Kant (...)"⁵⁵

A ce propos, il est instructif de considérer la réponse donnée à une question posée par Petersen lors de la dernière interview qu'a consentie Bohr, à Petersen et à Kuhn le 17 Novembre 1962, un jour avant son décès:

"A.P: Comment considérez-vous l'histoire de la philosophie? Quelle sorte de contribution ont pu vous apporter des gens comme Spinoza, Hume et Kant?"

N.B.:C'est difficile de répondre, mais je sentais que ces diverses questions étaient traitées

⁵⁴ Shimony, A; dans "Physical and Philosophical Issues in the Bohr - Einstein debate" dans Feshbach, H.; Matsui, T.; Oleson, A.;Ed.Niels Bohr: **Physics and the World** (Harwood Academic Publishers, 1988) fait une comparaison entre Kant et Bohr.

⁵⁵ Réf. (45)

d'une manière inadéquate (pendant mes études)".⁵⁶

Tout ce que nous pouvons dire, à ce sujet, est que si nous acceptons le terme "transcendental" dans un sens très large et considérons, avec Hooner, ce mot

"Comme signifiant une préoccupation fondamentale concernant les conditions nécessaires pour la possibilité de la connaissance [liée avec l'expérience (...)]"⁵⁷,

nous pouvons soutenir qu'il existe un certain aspect kantien dans la pensée de Bohr. Quelques auteurs ont analysé les idées de Bohr pour développer en détail l'affirmation précédente.⁵⁸

Plus intéressant que d'étudier si Bohr est d'une certaine façon kantien est l'analyse de la cohérence de sa pensée. Si nous pouvons argumenter que Bohr est finalement un réaliste, la base de l'argumentation doit être, à notre avis, sa thèse linguistique de l'unicité du langage courant. Au cours des prochains chapitres nous montrerons comment Bohr interprète la mécanique quantique sans avoir besoin d'adopter un cadre ontologique. Cependant, toute son interprétation est fondée sur sa thèse de l'unicité du langage courant qu'il n'a pas justifié dans ses propres écrits. Si l'on prend en compte le récit de Heisenberg (citation 32) on pourrait trouver une justification à la thèse de l'unicité du langage courant. Mais cette justification serait réaliste, c'est-à-dire faite dans un cadre ontologique. Nous pouvons nous demander si finalement il n'existe pas une incohérence fondamentale dans la pensée de Bohr. Nous en parlerons davantage au chapitre 6.

Pour terminer le chapitre il est intéressant de considérer les phrases que Petersen attribue à Bohr à propos de la nécessité éventuelle de créer des concepts nouveaux:

"(...) notre problème n'est pas un défaut de concepts adéquats. Ce qui peut nous manquer c'est une compréhension suffisante de l'usage non-ambigu de ces concepts que nous possédons".⁵⁹

⁵⁶ Cité par Holton, G; dans "Les racines de la complémentarité" en **L'imagination scientifique**. (Gallimard, Paris p. 102 1981

⁵⁷ Hooner, J.; "The Transcendental Philosophy of Niels Bohr", **Studies in History and Philosophie of Science**. Vol 13, No.1.1982 p 1-29.

⁵⁸ Voir Réf. (57) et les articles qu'y sont cités.

⁵⁹ Petersen, A.; "The philosophy of Niels Bohr". **Bulletin of the Atomic Scientist** 19. 1963 p. 8-14

CHAPITRE 3

LE QUANTUM D'ACTION

Dans les deux premiers chapitres, nous avons vu que pour Bohr la science vise à augmenter et à ordonner l'expérience humaine communicable sans ambiguïté et que le seul langage qui permet un usage non ambigu est le langage courant suffisamment raffiné par la terminologie de la physique classique.

Nous rappellerons dans ce chapitre les difficultés bien connues que les régularités quantiques présentent lorsque l'on tente de les analyser en termes de concepts classiques. La nécessité d'employer ces derniers pour décrire les expériences mêmes qui fournissent l'information sur les régularités en question et l'impossibilité de créer un nouveau langage qui pourrait éventuellement les expliquer, constituent pour Bohr le paradoxe quantique.

Comment la description peut-elle rester objective?

Comment doit s'organiser l'information sur les phénomènes quantiques?

3.1 INADEQUATION DE L'USAGE ORDINAIRE DU LANGAGE CLASSIQUE POUR EXPLIQUER LES REGULARITES QUANTIQUES.

La conclusion donnée dans le titre de cette section, Bohr l'exprime de cette manière:

"(...) le développement récent de la théorie atomique nous a donné la preuve inattendue d'une limitation essentielle de la description mécanique de la nature."⁶⁰

"(...) dans le problème général de la théorie quantique l'on n'affronte pas une modification des théories mécaniques et électromagnétiques descriptible en termes des concepts physiques usuels, mais plutôt un échec essentiel des images dans l'espace et le temps sur lesquelles la description des phénomènes naturels a été fondée jusqu'à présent."⁶¹

"En fait nous reconnaissons dans l'existence du quantum d'action une limitation inhérente, par rapport au problème de la constitution atomique, non seulement de tous les concepts de la physique classique mais aussi des idées sous-jacentes à notre description de l'expérience quotidienne."⁶²

Examinons maintenant les faits qui amènent Bohr à la conclusion précédente.

3.1.1. L'existence du quantum d'action

L'existence même du quantum d'action est un fait qui, selon Bohr, ne peut s'expliquer de manière classique et qui montre donc une limitation essentielle de la description classique.

Bohr rappelle que, selon la théorie électromagnétique classique, la lumière est une onde et que, dans l'image ondulatoire de la lumière, se trouve l'idée du transfert continu de l'énergie. D'autre part, la

⁶⁰ P, p.2

⁶¹ A, p.27

⁶² A, p. 399

découverte du quantum de lumière révéla un caractère discret, d'atomicité, d'individualité dans le mécanisme de la transmission de l'énergie lumineuse. Il a été démontré, en effet, que tout transfert d'énergie par la lumière peut se réduire à des processus individuels, chacun consistant en un échange d'un quantum de lumière dont l'énergie E est égale au produit de la fréquence ν de la vibration électromagnétique par la constante de Planck h , appelée aussi le quantum d'action⁶³, et dont l'impulsion p est égale à l'inverse de la longueur d'onde λ multipliée par la même constante h :

$$E = h\nu \quad \text{et} \quad p = h/\lambda \quad (3-1)$$

Cette opposition entre l'atomicité de l'effet lumineux et la continuité du transfert de l'énergie dans la théorie électromagnétique, indique, pour Bohr, une limitation des théories classiques puisque:

- a) Comme il a été dit, on suppose dans la théorie électromagnétique un transfert continu de l'énergie, ce qui est en opposition avec le caractère d'atomicité que montre la découverte du quantum d'action.
- b) Cependant, il n'est plus possible de revenir à la théorie qui considère que la lumière est constituée de particules matérielles dont chacune a sa trajectoire bien définie car dans tous les phénomènes où l'image ondulatoire joue un rôle essentiel, il est impossible de déterminer les trajectoires de ces particules matérielles sans perturber totalement le phénomène observé.

Un autre point qui rend le dilemme aigu, pour Bohr, est que l'énergie et l'impulsion d'un photon, ou quantum d'énergie lumineuse, s'obtiennent en multipliant respectivement h par la fréquence et par l'inverse de la longueur d'onde, c'est-à-dire qu'ils se réfèrent directement aux caractéristiques de l'image ondulatoire.

La découverte de h nous met, souligne Bohr, en face d'un dilemme connu comme la dualité onde - particule, dualité que Louis de Broglie montra pouvoir s'étendre au comportement des particules matérielles.

3.1.2. La stabilité de la matière

L'existence du quantum d'action n'est pas, cependant, l'unique élément qui a convaincu Bohr de la nécessité de renoncer à la description classique. La stabilité même de la matière est pour lui un argument puissant en ce sens:

"(...) si la mécanique newtonienne nous révèle et nous fait comprendre l'harmonie des mouvements planétaires qu'expriment les lois de Kepler, il n'est pas moins évident que des modèles mécaniques tels que le système solaire qui, après une perturbation, ne tendent jamais à retourner à leur état initial, ne peuvent présenter la stabilité que doivent avoir les configurations électroniques responsables des propriétés spécifiques des éléments.

Cette stabilité des atomes apparaît avant tout en analyse spectrale: celle-ci a montré, comme on sait, que chaque élément possède un spectre caractéristique, constitué de raies fines, et tellement indépendant des conditions extérieures, qu'il nous permet de déterminer par des observations spectroscopiques la composition matérielle des

⁶³ La constante h a les dimensions de la variable physique nommée action (énergie x temps).

étoiles, même les plus lointaines."⁶⁴

"En réalité, le mouvement dans un atome exige une stabilité assez différente de celle en cause dans un système mécanique usuel. Il est vrai que les lois mécaniques dans un cas tel que le système solaire donnent lieu à des mouvements qui possèdent un degré élevé d'harmonie et de stabilité, mais rien n'interdit, néanmoins, qu'en principe tout mouvement soit changé d'une façon arbitraire par l'action des influences extérieures appropriées. Cependant, pour expliquer les propriétés physiques et chimiques des éléments, nous devons requérir une stabilité des atomes de telle sorte que l'état originel d'un atome soit complètement restauré de lui-même après une influence extérieure quelconque."⁶⁵

En particulier, dans le cadre du modèle de l'atome de Rutherford, avec un noyau positif au centre et des électrons périphériques, il n'est pas possible, du point de vue de la mécanique classique, de comprendre la stabilité atomique car aucun système classique de particules ponctuelles n'admet un équilibre statique stable et n'importe quel mouvement autour du noyau impliquerait, selon la théorie électromagnétique classique une dissipation d'énergie qui aboutirait à une contraction toujours plus forte de tout le système en finissant par le 'collapsus' des électrons dans le noyau.

A ces arguments, dit Bohr, s'ajoute le fait que c'est précisément le quantum d'action qui permet d'expliquer la stabilité atomique:

"(...) sur laquelle est fondée essentiellement la description mécanique de tout phénomène naturel (...)"⁶⁶

puisque cette stabilité explique l'existence des corps solides:

"(...) sur laquelle reposent en dernière analyse toutes les mesures qui servent à ordonner les phénomènes dans l'espace et le temps."⁶⁷

Bohr remarque également que, étant donné que la description classique toute entière dépend de la stabilité des corps solides ordinaires, nous ne devons pas être surpris de voir apparaître de nouveaux aspects de la philosophie naturelle précisément dans cette partie de la science où cette stabilité même est objet de recherche.

Les faits que nous venons de présenter convainquirent Bohr de la nécessité impérieuse et irrévocable de renoncer à l'explication classique de l'existence du quantum d'action. Ce dernier doit s'accepter comme une chose fondamentale qui n'admet ni ne requiert d'explication:

"(...) le quantum d'action apparaît dans la description des phénomènes atomiques comme un élément pour lequel une explication n'est ni possible ni requise (...)"⁶⁸

Une fois que l'on accepte le quantum d'action en tant qu'élément irréductible, il est nécessaire de trouver et d'analyser les conséquences qui en découlent. Avant cela, cependant, nous tâcherons de montrer que Bohr était déjà convaincu, dès l'époque de son modèle atomique, de la

⁶⁴ P, p.23

⁶⁵ A, p.24

⁶⁶ P, p.5

⁶⁷ P, p.6

⁶⁸ P, p.115

nécessité inéluctable de renoncer à une explication classique des régularités quantiques.

3.1.3. Le renoncement à expliquer de façon classique les phénomènes quantiques: une constante dans la vie intellectuelle de Bohr.

Dans plusieurs citations, Bohr suggère que sa conviction de l'inadéquation du langage classique pour rendre compte des régularités quantiques était déjà formée à l'époque de son modèle atomique de 1913:

"(...) c'est seulement par un renoncement conscient à nos exigences usuelles de visualisation et de causalité qu'il était possible d'utiliser d'une façon fructueuse la découverte de Planck pour expliquer les propriétés des éléments sur la base de notre connaissance des parties fondamentales des atomes. En prenant l'indivisibilité du quantum d'action comme point de départ, l'auteur suggéra que chaque changement dans l'état d'un atome devrait être considéré comme un processus individuel par lequel l'atome va de l'un à l'autre des états dits stationnaires (...) "⁶⁹

"(...) ce point de vue (les postulats de Bohr) nous offre une manière cohérente d'ordonner les données expérimentales, mais l'on doit admettre que la cohérence s'atteint uniquement au prix du renoncement à toute tentative d'obtenir une description détaillée des processus de transition individuels."⁷⁰

L'article dans lequel Bohr parle plus explicitement de l'évolution des idées qui aboutirent à la création du modèle atomique est: "The Rutherford Memorial Lecture" de 1958. Bohr raconte d'abord qu'après avoir terminé ses études à Copenhague, il se rendit à Cambridge pour travailler avec J.J. Thompson et, au début du printemps de 1912, termina son travail avec se dernier et se rattacha au groupe que dirigeait Rutherford à Manchester. Les recherches du groupe de Manchester portaient à cette époque pour la plupart sur les conséquences du modèle atomique de Rutherford, et Bohr s'intéressa en particulier au problème de la stabilité de celui-ci qui, comme nous l'avons vu, ne pouvait s'expliquer au moyen de la physique classique.

Bohr avoue ne pas avoir été très surpris par cette situation, puisque la limitation essentielle des théories classiques qui avait été révélée par la découverte du quantum d'action était déjà connue et ce quantum d'action avait trouvé des applications prometteuses dans le domaine des chaleurs spécifiques et des réactions photochimiques.

"Lors de mon séjour à Manchester au printemps de 1912, je suis parvenu très tôt à me convaincre que la constitution de l'atome de Rutherford était gouvernée totalement par le quantum d'action."⁷¹

Après plusieurs tentatives pour appliquer les idées quantiques d'une manière cohérente, Bohr s'aperçut que la clé du problème résidait dans les lois des spectres optiques des éléments et c'est avec cette clé qu'il construisit son modèle.

Dès le début, néanmoins, Bohr était très conscient des énormes difficultés conceptuelles auxquelles se heurtait sa théorie.

⁶⁹ A, p.108

⁷⁰ A, p.109

⁷¹ E, p.35

"La recherche d'une relation plus étroite entre le modèle atomique de Rutherford et l'évidence spectrale se heurtait évidemment à des problèmes complexes. D'un côté, la définition même de la charge et de la masse de l'électron et du noyau se basait entièrement sur une analyse des phénomènes physiques fondée sur les principes de la mécanique et l'électromagnétisme classiques. D'un autre côté le dit postulat quantique, qui affirme que tout changement de l'énergie intrinsèque de l'atome consiste en une transition complète entre deux états stationnaires, excluait la possibilité de rendre compte, au moyen des principes classiques, des processus radioactifs ou de toute autre réaction impliquant la stabilité de l'atome."⁷²

Quelle était l'opinion de Bohr à cette époque, quant à la solution de ces difficultés? Envisageait-il un retour aux lois classiques ou était-il déjà convaincu de l'impossibilité d'un tel retour? Bohr lui-même nous dit qu'il avait exprimé ses pensées à l'occasion d'une séance de la Société Physique Danoise en 1913. Les paroles prononcées indiquent que c'est la deuxième possibilité que Bohr avait à l'esprit:

"J'espère que je me suis exprimé assez clairement pour que vous puissiez- apprécier à quel point ces considérations entrent en conflit avec le schéma conceptuel, d'une logique admirable, que l'on a appelé à bon droit la théorie classique de l'électrodynamique. D'autre part, j'ai essayé de vous communiquer l'impression que - justement par une analyse plus poussée de ce conflit - il serait possible avec le temps d'établir également entre les idées nouvelles une certaine cohérence."⁷³

Max Jammer a fait une analyse détaillée des articles dans lesquels Bohr présente son modèle⁷⁴ et est arrivé à des conclusions similaires aux nôtres. Jammer conclut son analyse avec une image assez évocatrice:

"Nous voyons donc que, au contraire de Planck et d'Einstein, Bohr n'essaie pas de construire un pont sur l'abîme qui sépare la physique classique de la physique quantique, mais, dès le début de son travail, recherche un schéma des conceptions quantiques qui puisse former un système aussi cohérent, d'un côté de l'abîme, que celui des notions classiques, de l'autre côté."⁷⁵

Dans d'autres citations, Bohr affirme explicitement qu'il était convaincu de l'échec définitif du langage classique dès avant les développements de Heisenberg et Schrödinger qui aboutirent à la création de tout l'appareil mathématique de la mécanique quantique:

"Lorsque j'eus le grand bonheur de rencontrer Einstein pour la première fois, au cours d'une visite à Berlin en 1920, ces questions fondamentales formèrent le thème de nos conversations(...) Cependant il subsistait certaine différence dans nos attitudes et nos tendances car, sachant magistralement coordonner des expériences, contradictoires en apparence, sans abandonner ni la continuité, ni la causalité, Einstein hésitait à renoncer à cet idéal peut-être plus qu'un homme pour qui cette renonciation apparaissait comme la seule voie permettant d'accomplir la tâche immédiate de

⁷² E, p.38

⁷³ P, p.52

⁷⁴ Bohr, N; "On the constitution of atoms and molecules" Part I **Phil. Mag.** 26, 1913. p.1-25. Part II "Systems containing only a single nucleus". **Phil. Mag.** 26, 1913. p.473-502. Part III "Systems containing several nuclei". **Phil. Mag.** 26. 1913. p.857-875.

⁷⁵ Jammer, Max; **The Conceptual Development of Quantum Mechanics** (Mc Graw Hill, New York 1966) p. 88

coordonner les multiples données expérimentales que l'exploration du domaine atomique accumulait jour après jour."⁷⁶

Dans une lettre datant de 1922 et adressée à Hoffding, son professeur de Philosophie à Copenhague, Bohr dit:

"D'autre part nous trouvons des difficultés à un niveau tellement profond que nous n'avons aucune idée de la façon dont il faut les résoudre; mon opinion personnelle est que ces difficultés sont d'une telle nature qu'elles ne nous laissent guère d'espoir de pouvoir réaliser, dans le monde des atomes, une description dans l'espace et le temps qui corresponde à nos images ordinaires."⁷⁷

Pour terminer, voyons cette citation d'un essai de 1937, dans lequel Bohr exprime sa conviction avec une telle force, qu'il va jusqu'à affirmer que le développement ultérieur de la physique nous éloignera davantage de la description classique:

"Nonobstant sa très grande utilité, la formulation présente de la mécanique quantique ne semble être, si l'on la considère avec plus de profondeur, qu'un premier pas dans la généralisation nécessaire du mode classique de description,(...). Pour une corrélation des lois de la nature plus profondes encore qui impliquent non seulement l'interaction mutuelle des soi-disant constituants élémentaires de la matière mais aussi la stabilité de son existence,(...) nous devons nous préparer à une généralisation plus étendue du mode complémentaire de description qui demandera un renoncement encore plus radical aux exigences usuelles de la soi-disant visualisation."⁷⁸

Étudions maintenant les conséquences qui découlent de l'acceptation du quantum d'action.

3.1.4 Première conséquence: Le caractère de totalité des processus atomiques.

Bohr exprime cette idée dans bon nombre de ses articles:

"Le point essentiel, dans ce que nous a appris le développement de la physique atomique, est de nous avoir fait reconnaître le caractère de totalité que le quantum d'action confère aux processus atomiques."⁷⁹

"(...) l'existence du quantum élémentaire d'action met en évidence, dans les processus physiques, un caractère entièrement nouveau d'individualité qui est totalement étranger aux lois classiques de la mécanique ou de l'électromagnétisme (...)"⁸⁰

"Le point décisif est ici d'avoir reconnu que toute tentative est vouée à l'échec, qui aurait pour but d'analyser à l'aide de méthodes et de concepts de la physique classique l'individualité' des processus atomiques qui résulte de l'existence du quantum d'action, et cela parce qu'il est impossible de séparer nettement un comportement non perturbé des objets atomiques de leur interaction avec les instruments de mesure indispensables pour cette analyse."⁸¹

⁷⁶ P, p.54 (souligné par J.R.CH.)

⁷⁷ Citée par Jammer dans la Réf. (75)

⁷⁸ Bohr, N; "Causality and complementarity" **Philosophy of Science** Vol.4, No. 3, July 1937, p.289

⁷⁹ P, p.ix

⁸⁰ P, p.24

⁸¹ P, p.3

"Les connaissances nouvelles que nous avons acquises sur le comportement des atomes isolés et des corpuscules atomiques nous ont révélé en effet de manière inattendue qu'aucune action physique ne peut être subdivisée au-delà d'une certaine limite, ce qui dépasse beaucoup la vieille doctrine de la divisibilité limitée de la matière et donne à tout processus atomique un caractère étrange d'individualité."⁸²

"(...) le caractère global, qui est l'essence d'un phénomène proprement quantique, trouve son expression logique en ceci que, si nous tentions de le subdiviser, nous serions obligés de faire subir au dispositif expérimental un changement qui l'empêcherait de nous apparaître."⁸³

"(...) il faut tenir compte de la totalité du dispositif de mesure pour décrire le phénomène de façon bien définie. Toute subdivision définissable impliquerait un changement du dispositif avec apparition de nouveaux phénomènes individuels: c'est là l'expression et en même temps la conséquence de l'indivisibilité des phénomènes atomiques."⁸⁴

"(...) l'hypothèse d'une divisibilité indéfinie des phénomènes, sur laquelle repose toute description de physique classique, est incompatible avec le caractère de totalité des phénomènes typiquement quantiques, totalité qui s'exprime par le fait que toute subdivision exigerait une modification du dispositif expérimental, et que celle-ci ferait apparaître de nouveaux effets individuels."⁸⁵

Il est possible de résumer de cette manière l'idée principale exprimée dans les citations précédentes: l'existence du quantum d'action confère aux processus ou aux phénomènes atomiques un caractère de totalité, de discontinuité, d'indivisibilité ou d'individualité qui se manifeste par le fait que toute subdivision du phénomène exigera une modification du dispositif expérimental qui fera apparaître de nouveaux effets individuels et qui sera, donc, incompatible avec la définition du phénomène que l'on étudie.

Nous devons préciser que les deux premières conséquences de la existence de h que nous avons identifié: le caractère de totalité des processus atomiques, ici présenté, et l'indivisibilité de l'objet et l'instrument d'observation, considéré plus loin, sont étroitement liés. En conséquence il est difficile, dans leur description, d'éviter un glissement de l'une à l'autre. Nonobstant cela nous avons trouvé convenable dans cette section de les séparer pour mieux comprendre les conséquences qui, selon Bohr, découlent de l'existence de h .

Un exemple est celui du phénomène d'interférence d'un faisceau d'électrons qui passe à travers deux fentes et arrive ensuite sur un écran. Si l'on tente de subdiviser le phénomène et de savoir par quelle fente passe chaque électron, on détruit le phénomène d'interférence.

Pour montrer plus précisément comment l'existence du quantum d'action confère ce caractère de totalité à un phénomène comme celui de l'interférence il est nécessaire de rappeler au préalable le principe d'incertitude de Heisenberg.

⁸² P, p.35

⁸³ P,p.

⁸⁴ P, p.136

⁸⁵ P, p.151

Dans la théorie quantique on introduit un formalisme où les variables cinématiques et dynamiques de la mécanique classique sont remplacées par des symboles assujettis à une algèbre non commutative. Par exemple, les variables conjuguées p et q s'expriment par des symboles assujettis à la loi de commutation:

$$[qp - pq] = \sqrt{-1} \frac{h}{2\pi} \quad (32)$$

Les règles de la commutation (3-2) imposent une limitation réciproque à la fixation des variables conjuguées q et p , limitation qui s'exprime par la relation d'incertitude:

$$\Delta q \Delta p = h/4\pi \quad (3-3)$$

où Δq et Δp sont des incertitudes convenablement définies dans la détermination de ces variables.

L'analyse que Bohr fait du phénomène d'interférence d'électrons illustre bien le caractère de totalité des phénomènes atomiques. Pour répondre à des objections d'Einstein au sujet des relations d'incertitude Bohr propose le dispositif suivant:

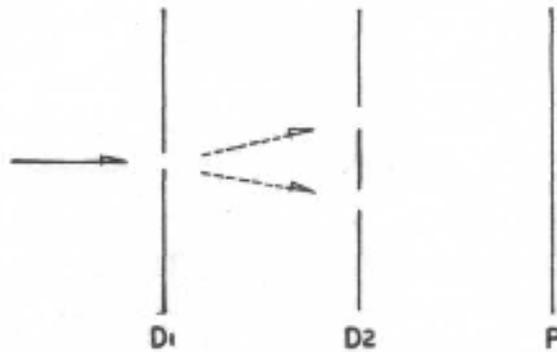


Figure 3-1

Un faisceau parallèle d'électrons venant de gauche tombe sur un diaphragme D_1 . Entre ce diaphragme et une plaque photographique P se trouve inséré un second diaphragme D_2 à deux fentes parallèles. On observe sur la plaque, dans les conditions habituelles, une figure d'interférence.

Nous présenterons l'analyse dans les propres termes de Bohr. Il faut dire que le σ qu'il emploie est égale à $1/\lambda$ et que la formule (1) est $p = h\sigma$.

"Comme l'indiquent les flèches en pointillé, l'impulsion transférée au premier diaphragme doit être différente selon que l'on admet que l'électron passe par l'une ou l'autre des deux fentes du second; en conséquence Einstein suggéra qu'un contrôle du transfert d'impulsion devait permettre une analyse plus exacte du phénomène et, en particulier, de décider par laquelle des deux fentes l'électron est passé avant d'atteindre la plaque.

Un examen plus approfondi montra cependant que le contrôle proposé du

transfert d'impulsion entraînerait, sur la position du diaphragme, une incertitude qui empêcherait l'apparition du phénomène d'interférence en question. En effet, si ω est le petit angle que font entre elles les trajectoires hypothétiques de la particule passant par la fente supérieure ou inférieure, la différence des impulsions transférées dans ces deux cas sera, d'après (1), égale à $h\sigma\omega$, et tout contrôle de l'impulsion du diaphragme assez précis pour mesurer cette différence devra, par suite de la relation d'indétermination, comporter une incertitude minimum sur la position du diaphragme, de l'ordre de $1/\sigma\omega$. Si, comme dans la figure, le diaphragme à deux fentes est placé à égale distance du premier diaphragme et de la plaque photographique, le nombre de franges par unité de longueur est justement égal à $\sigma\omega$: une incertitude de l'ordre de $1/\sigma\omega$ dans la position du premier diaphragme entraînera une incertitude égale dans la position des franges, d'où la disparition de tout effet d'interférence. Comme on le voit aisément, ce résultat vaut pour tout autre emplacement du second diaphragme entre le premier et la plaque; il en serait de même, si, au lieu du premier diaphragme, on se servait d'un autre de ces trois corps pour contrôler le transfert d'impulsion"⁸⁶

Il est important de souligner ici que dans la situation envisagée pour déterminer le transfert d'impulsion le premier diaphragme doit être considéré comme soumis aux relations d'incertitude, c'est-à-dire que, malgré son caractère macroscopique, il doit se traiter comme un objet quantique. Cet aspect de l'analyse est plus clairement décrit par Bohr lui-même. Il écrit que pour étudier un phénomène d'interférence d'électrons il semble naturel de se servir d'un montage où les parties solides de l'appareil qui servent à supporter les diaphragmes et la plaque photographique sont fortement rivées à un support commun.

"Dans un tel dispositif, où la connaissance des positions relatives des diaphragmes et de la plaque est assurée par une connexion rigide, il est évidemment impossible de contrôler l'impulsion échangée entre la particule et les diverses parties de l'appareil (...). Dans l'étude d'un phénomène dont la description comporte un bilan exact d'impulsion il faut évidemment que certaines parties du dispositif soient libres de se mouvoir indépendamment des autres."⁸⁷

Bohr propose donc une seconde expérience dans laquelle un diaphragme à fente est suspendu par de fins ressorts à un cadre rigide rivé au support où sont fixées également les autres parties immobiles du dispositif. Il y a une échelle dessinée sur le diaphragme et une pointe est attachée au montant du cadre.

"L'échelle dessinée sur le diaphragme ainsi que la pointe attachée au montant du cadre servent à observer le mouvement du diaphragme, ce qui est nécessaire pour mesurer l'impulsion qu'il a reçue et en déduire une évaluation de la déflexion subie par la particule à la traversée de la fente. Mais puisque toute lecture de l'échelle, de quelque façon qu'elle soit faite, entraîne une variation incontrôlable de l'impulsion du diaphragme, il y aura toujours, en accord avec le principe d'indétermination, une relation de réciprocité entre notre connaissance de la position de la fente et la précision de la mesure de l'impulsion."⁸⁸

⁸⁶ P, p.68-69

⁸⁷ P, p.71-72

⁸⁸ P, p.72

Un autre exemple d'un corps macroscopique traité comme objet quantique est présenté par Bohr lorsqu'il analyse la mesure de la position d'un électron au moyen d'un microscope. L'analyse de Bohr est faite comme illustration du principe de Heisenberg.

Considérons la mesure de la coordonnée x . Nous devons illuminer l'électron et observer son image à travers le microscope. Nous supposons que l'image de l'électron est formée sur une plaque photographique.

Dénotons θ l'ouverture angulaire du cône de rayons de lumière dispersés par l'électron à travers l'objectif de l'appareil, λ : la longueur d'onde de la lumière qui illumine l'électron; et Δx l'incertitude sur la mesure de la coordonnée x de l'électron. Les lois de l'optique permettent d'affirmer que:

$$\Delta x = \frac{\lambda}{\sin\theta}$$

La relation précédente vient du fait que dans un microscope l'image de chaque point de l'objet observé est un point de diffraction d'extension finie.

Or, la dispersion de la lumière se fait par des photons individuels. Un photon au moins doit être dispersé par l'électron et arriver à travers le microscope aux yeux de l'observateur. Entre l'électron et le photon se fait un échange d'impulsion de l'ordre h/λ , d'après la relation (3-1).

On ne peut pas connaître exactement cet échange puisque la direction de photon dispersé est indéterminée dans le faisceau de rayons qui entrent dans le microscope. Il y a, en conséquence, une incertitude sur l'impulsion transférée à l'électron de l'ordre de $\Delta p_x = h \sin\theta/\lambda$. Nous trouvons donc:

$$\Delta x \Delta p_x = h$$

Bohr se demande si l'échange d'impulsion ne pourrait être déterminé au moyen de la loi de la conservation de l'impulsion à partir d'une mesure du changement d'impulsion du microscope - y compris la source de lumière et la plaque photographique pendant le processus d'observation

"Un examen plus détaillé montre, cependant, qu'une telle mesure est impossible, si en même temps nous voulons connaître la position du microscope avec une précision suffisante. En fait (...) la *position du centre de gravité d'un corps et son impulsion totale peuvent être définis seulement dans les limites de précision réciproque données par la relation (2)* .

[(2): $\Delta q \Delta p = h/4\pi$]." ⁸⁹.

3.1.5. Deuxième conséquence: Indivisibilité entre l'objet et l'instrument d'observation.

Une conséquence qui découle de l'analyse précédente de phénomènes tels que celui de l'interférence, est qu'il n'est pas possible désormais de faire la séparation stricte - telle qu'elle existe dans la conception mécanique de la nature - entre l'objet observé et l'instrument d'observation. Tout phénomène quantique dépend essentiellement du

⁸⁹ Bohr, N.: "The Quantum Postulate and the recent development of Atomic Theory", **Supp to Nature** April 14 1.929. p.580-590 (Souligné par J.R.CH.)

dispositif expérimental: Un arrangement adéquat pour observer les franges d'interférence ne permet pas de décider par quelle fente passent les électrons, et réciproquement un dispositif avec lequel il est possible d'observer par quelle fente passent les électrons empêche l'apparition des franges d'interférence. Nous avons vu que cette situation vient du fait que l'existence du quantum d'action ne permet pas dans un phénomène quantique, de définir avec précision l'interaction entre l'objet et l'appareil d'observation.

Nous devons apporter ici une précision. Dans son analyse de l'expérience d'interférence d'électrons au moyen d'un dispositif muni de deux diaphragmes l'un d'eux à deux fentes Bohr considère deux cas extrêmes :

- a) Le premier diaphragme est complètement fixé au support. On observe une figure d'interférence parfaite, nette.
- b) Le premier diaphragme est libre de se mouvoir indépendamment du reste du dispositif et l'on mesure l'impulsion du diaphragme avec une précision suffisante pour connaître par quelle fente du second diaphragme l'électron a passé. La figure d'interférence est détruite.

Wooters et Zurek⁹⁰ ont étudié la situation intermédiaire où la mesure de l'impulsion du second diaphragme n'est pas suffisamment précise pour déterminer exactement par quelle fente l'électron a passé. Ils ont montré que dans cette situation on obtient une certaine information sur la trajectoire des électrons. En même temps un certain degré de netteté de la figure d'interférence est obtenu. Ils définissent une quantité H qui est le degré d'information perdu sur la trajectoire des électrons et introduisent un paramètre S pour quantifier le degré de netteté de la figure d'interférence.

Wooters et Zurek montrent que pour un degré S de netteté donné il y a une quantité d'information perdue $H(S)$, et qu'au fur et à mesure que l'on obtient plus de netteté dans la figure d'interférence on perd plus d'information sur la trajectoire des électrons. Ce fait est l'expression de l'indivisibilité de l'objet et l'instrument d'observation. Les deux cas extrêmes analysés par Bohr sont

- a) Celui où l'on obtient une netteté parfaite et on perd toute l'information⁹¹ sur la trajectoire des électrons.
- b) Celui où l'on obtient une information maximale sur la trajectoire des électrons et on perd totalement la figure d'interférence.

Nous devons insister sur le fait que ce n'est pas l'existence de l'interaction entre l'objet et l'appareil qui a pour conséquence leur indivisibilité. Cette interaction existe, bien entendu, dans toute expérience, que ce soit en physique quantique ou en physique classique. C'est le fait que l'on ne peut pas connaître avec précision cette interaction dans un phénomène quantique qui a pour conséquence que l'on ne puisse ni la compenser ni la

⁹⁰ Wooters, W.K. and Zurek, W.H.;"Complementarity in the double-slit experiment: Quantum non-separability and a quantitative statement of Bohr's principles" **Phys. Rev. D** 19, 1.979. p.473 -484

⁹¹ Nous devons préciser ici que s'il y a des ambiguïtés dans la façon de Wooters et Zurek d'employer le mot "information" et que s'il n'est pas totalement claire que l'expression "information perdue" doit être prise dans un sens réaliste ou non, chez Bohr le mot "information" doit être compris tel que nous le verrons au chapitre 4 - comme information définissable au moyen de l'utilisation d'un appareil de mesure concret.

négliger comme c'est le cas dans un phénomène classique.

Bohr dit que cette interaction est une partie indissociable des phénomènes quantiques:

"(...) la différence fondamentale que présentent, dans l'analyse des phénomènes, la physique quantique et la physique classique est que, dans celle-ci, l'interaction entre les objets et les instruments de mesure peut être négligée alors que, dans la première, cette interaction est partie intégrante du phénomène."⁹²

"(...) l'interaction entre les instruments de mesure et les systèmes physiques étudiés constitue une partie intégrante du phénomène quantique (...)"⁹³

"Une description causale au sens classique n'est possible que dans le cas où l'action mise en jeu est grande par rapport au quantum, et où, par conséquent, les phénomènes peuvent être subdivisés sans être notablement perturbés. Quand cette condition n'est pas remplie, nous ne pouvons négliger l'interaction entre l'instrument de mesure et l'objet observé (...)"⁹⁴

La première partie de la citation précédente exprime la condition nécessaire pour avoir une description classique. Cette condition est connue aussi comme le principe de correspondance.

Ce principe exprime le fait qu'à la limite où l'action physique mise en jeu dans un phénomène est grande par rapport au quantum, une description causale au sens classique est possible. L'idée précédente fut utilisée par Bohr comme un principe heuristique qui joua un rôle historique dans le développement de la mécanique quantique. Dans sa forme la plus précise, le principe de correspondance établit une analogie formelle entre la théorie classique et la théorie quantique, analogie qui a servi comme guide dans les interprétations des résultats de la nouvelle théorie.

Dans les expériences décrites auparavant où un objet macroscopique tel qu'un microscope ou un diaphragme doit être traité comme un objet quantique, nous avons affaire à des situations dans lesquelles l'action physique en jeu pour les appareils a été de l'ordre de h .

Il est important de remarquer que, pour Bohr, la frontière entre les deux théories ne coïncide donc pas avec celle qui sépare le microscopique et le macroscopique, puisqu'il peut arriver que les paramètres physiques en jeu dans un phénomène donnent lieu à une action de l'ordre du quantum et que, cependant, la dimension du système en question soit du domaine macroscopique.

L'indivisibilité entre l'objet et l'instrument de mesure ne permet pas, selon Bohr, de parler d'un comportement des objets quantiques qui soit indépendant des moyens d'observation:

"(...) (le quantum universel d'action) confère aux processus atomiques un caractère de totalité qui rend impossible la séparation, que fait la conception mécanique

⁹² P, p.109

⁹³ P, p.102

⁹⁴ P, p.7

de la nature, entre l'observation des phénomènes et le comportement propre des objets."⁹⁵

"En physique quantique nous ne pouvons, en effet, soutenir les idées usuelles qui considèrent les propriétés et le comportement des objets que l'on étudie comme séparés de l'interaction entre ces objets et les instruments de mesure, indispensables à la définition des circonstances dans lesquelles les phénomènes ont lieu."⁹⁶

"(...) le postulat quantique implique que toute observation d'un phénomène atomique entraînera une interaction avec l'agent d'observation qui ne peut pas être négligée. En conséquence, une réalité indépendante au sens physique ordinaire ne peut être attribuée ni aux phénomènes ni aux agents d'observation."⁹⁷

Nous examinerons dans le sixième chapitre les conséquences que cette indivisibilité entraîne pour l'idée de la réalité physique, et, comme nous l'avons déjà dit, nous ferons une comparaison avec la non-séparabilité dans le cinquième chapitre.

3.1.6 Troisième conséquence: Le caractère essentiellement statistique de la mécanique quantique.

La troisième conséquence est, pour Bohr, évidente. En effet, nous avons remarqué dans le deuxième chapitre que dans le cas où il n'est pas possible de réaliser une séparation stricte entre l'objet et l'instrument de mesure, il n'est pas possible non plus - dans le cadre des idées de Bohr - d'obtenir une description déterministe. La mécanique quantique possède en conséquence un caractère statistique inhérent.

Bohr exprime cela de cette façon;

*"L'interaction finie entre l'objet et l' instrument de mesure, conséquence immédiate de l'existence du quantum d'action, entraîne - parce qu'il est impossible de contrôler la réaction de l'objet sur les appareils - la nécessité de renoncer définitivement à l'idéal classique de causalité (...)"*⁹⁸

"(...) le principe de causalité, regardé jusqu'alors comme le fondement indiscutable de toute interprétation des phénomènes naturels, s'est révélé un cadre trop étroit pour embrasser les lois toutes particulières qui régissent les processus atomiques individuels."⁹⁹

3.2 PEUT-ON PARLER D'UN OBJET QUANTIQUE ET DE SA "PERTURBATION" PAR L'OBSERVATION?

Nous venons de voir que pour Bohr tout le langage courant devient inadéquat pour rendre compte des régularités quantiques. Cela veut dire que les mots qui font allusion aux

⁹⁵ P, p.149

⁹⁶ Bohr, N; "Physical Science and the Study of Religions" dans **studi Orientaia Ionni Pedersen Septuagenario**(Einer Munksgaard. 1953) p.385 - 390

⁹⁷ A, p.148

⁹⁸ P, p.88 (Souligné par Bohr lui même)

⁹⁹ P, p.36

attributs physiques des objets ordinaires deviendront ambigus s'ils se réfèrent à un "objet" quantique. En fait, le mot même "objet" devient ambigu s'il est employé pour expliquer un phénomène quantique.

Bohr illustre ce point dans la citation suivante.

"Lorsqu'un miroir semi argenté est placé sur le chemin d'un photon, lui offrant deux directions possibles de propagation, le photon peut être enregistré sur l'une et l'une seulement de deux plaques photographiques placées à grande distance dans les deux directions; mais nous pouvons aussi, remplaçant les plaques par des miroirs, observer des effets qui mettent en évidence les interférences entre les deux trains d'ondes réfléchis. Il en résulte que, dans tout essai de représentation visuelle du comportement du photon, nous rencontrerons la difficulté suivante: Nous serons obligés de dire, d'une part, que le photon choisit toujours l'*une* des deux voies et, d'autre part, qu'il se comporte comme s'il avait suivi *les deux voies*."¹⁰⁰

Bohr conclut:

"Ce sont justement des arguments de cette espèce qui (...) révèlent l'ambiguïté de toute attribution aux objets atomiques de qualités physiques habituelles."¹⁰¹

Bohr se réfère aussi à

"(. . .) l'ambiguïté essentielle qui naît du fait même que l'on attache des attributs physiques à des objets impliqués dans de phénomènes qui ne permettent aucune distinction nette entre le comportement propre de ces objets et leur interaction avec les instruments de mesure."¹⁰²

Et il dit même que:

" En vérité, à cause de cette situation, même des mots tels que "être" et "connaître" perdent leur signification non-ambiguë."¹⁰³

La phrase précédente peut mieux se comprendre en remarquant que l'emploi du mot "être" pour se référer à un objet ordinaire implique qu'il est possible de concevoir l'objet comme existant indépendamment du fait qu'il soit ou non observé. Cela entraîne que l'on peut en principe négliger ou compenser l'interaction qui nous permet de savoir qu'existe, en effet, cet objet indépendant de nous-mêmes. Un argument similaire peut s'utiliser en ce qui concerne l'usage du mot "connaître."

Nous devons conclure que, pour Bohr, il n'est pas possible, strictement, de parler des propriétés indépendantes d'un objet quantique et que l'emploi même du mot "objet" devient maintenant ambigu. Il faut parler de la totalité du phénomène quantique, y compris l'instrument de mesure.

Or, selon Bohr, le seul langage qui peut avoir un usage non-ambigu est le langage courant. En conséquence, nous pourrions difficilement, nous passer de mots comme "objet", "être",

¹⁰⁰ P, p.74-75

¹⁰¹ P, p.75

¹⁰² P, p.90

¹⁰³ A, p. 19

"connaître" et "perturbation". D'autre part, il ne serait pas commode d'écrire un article scientifique en précisant chaque fois tout l'appareil. Nous pourrions donc, par convention, parler d'un objet quantique et lui attribuer des propriétés. Comme le note d'Espagnat:

"L'objet et l'instrument forment, il est vrai, un tout inséparable et parler de l'impulsion de l'objet n'est donc qu'une convention; mais celle-ci est très commode et, pourvu qu'on soit conscient de ses limites, elle ne présente pas d'inconvénient."¹⁰⁴

Au chapitre 4 nous proposerons un autre sens précis de l'usage du mot "objet" dans un phénomène quantique.

Sur l'emploi du mot "perturbation" nous pouvons faire des remarques similaires.

Nous devons, à propos d'un phénomène quantique, employer le mot "perturbation" pour nous référer au fait que si l'on a un phénomène donné et que l'on change le dispositif expérimental, on obtient un nouveau phénomène. Si l'on emploie, par convention, le mot "objet", on peut dire que l'"objet" a été "perturbé". Il ne s'agit pas d'une perturbation au sens physique classique ou comme l'exprime Bohr:

"(...) il n'est pas question dans un tel cas d'une perturbation mécanique du système étudié... la question essentielle est celle *d'une influence sur les conditions mêmes qui définissent les types possibles de prédictions relatives au comportement futur du système...*"¹⁰⁵

3.3. LE PARADOXE QUANTIQUE

Les considérations de la section précédente sont cohérentes avec l'idée d'acceptation du quantum d'action comme un élément qui ne peut pas être expliqué au moyen de l'usage normal du langage courant. Nonobstant cela, toute l'analyse a incontestablement un air extraordinairement paradoxal et contradictoire. En effet, on soutenait que le langage courant était le seul qui permettait de parvenir à la non-ambiguïté et, par suite, à l'objectivité. Et maintenant on soutient que ce langage devient ambigu si on l'emploie pour rendre compte des régularités quantiques.

Comment peut-on continuer à faire de la science si l'on est dépourvu de la possibilité d'expliquer sans ambiguïté ce qui se passe dans un phénomène quantique?

Quelle est maintenant la différence entre la science et une activité telle que la poésie?

Pour résoudre le paradoxe précédent, le plus fondamental de la physique quantique, Bohr créera une nouvelle manière d'employer le langage: le mode complémentaire de description.

3.4 CONSIDERATIONS CRITIQUES

Nous avons montré les arguments qui ont convaincu Bohr de la nécessité indispensable et irrévocable de renoncer à l'explication classique de l'existence du quantum d'action. Bohr présente ses assertions comme des énoncés contraignants; cependant il existe d'autres possibilités logiques différentes de celle qu'il propose comme

¹⁰⁴ d'Espagnat, B; **Conceptions de la Physique Contemporaine**, (Hermann, Paris, 1965) p.103

¹⁰⁵ P, p. 89 (Souligné par Bohr lui même)

étant la seule et unique. En effet, il peut être soutenu que la mécanique quantique est une théorie incomplète et que en la complétant il sera possible d'arriver à expliquer les régularités quantiques avec l'usage normal du langage classique déterministe et objectif au sens fort. De cette façon il n'y aurait pas de dichotomie entre les phénomènes quantiques et les phénomènes classiques. L'on trouve plusieurs variantes dans la conception de l'incomplétude de la mécanique quantique:

A. Einstein recherchait une théorie générale de la matière dans la direction de la relativité générale et d'une géométrisation des champs d'interaction. Dans cette théorie le quantum d'action apparaîtrait de manière naturelle et la théorie quantique ne serait à la fin qu'une approximation.¹⁰⁶

B. Louis de Broglie, David Bohm et d'autres encore considèrent que la mécanique quantique est une sorte de mécanique statistique qui ne donne que les valeurs moyennes des quantités mesurées, mais que dans un niveau plus profond, sub-quantique, il existe des processus plus fins sous-jacents soumis à des lois strictement déterministes. Il y aurait donc des variables supplémentaires qui, conjointement avec la fonction d'onde, détermineraient l'évolution future du système physique auquel elles appartiennent. La valeur des grandeurs usuelles serait une moyenne sur les valeurs des variables supplémentaires. Ces dernières seraient des variables cachées puisqu'elles ne peuvent pas être détectées expérimentalement dans le cadre de la théorie quantique.¹⁰⁷

C. Un type particulier de théories à variables cachées est constitué par les interprétations stochastiques selon lesquelles la théorie quantique est fondamentalement une théorie classique des processus stochastiques. Le mouvement des particules microscopiques serait un mouvement Brownien produit par des entités sous-jacentes hypothétiques.¹⁰⁸

Une autre possibilité logique est le réalisme mathématique. Nous pouvons en identifier deux variantes;

A. La fonction d'onde ψ - ou son analogue en théorie des champs quantiques - doit se considérer comme étant la réalité. Comme l'évolution de ψ est déterministe la théorie quantique serait déjà une théorie déterministe.

B. Pour rétablir l'objectivité forte il suffirait de réifier à un degré plus élevé d'abstraction les concepts mathématiques et de considérer qu'il y a des réalités physiques que décrivent, par exemple, les opérateurs de la théorie quantique.

Nous ne ferons pas la critique de ces suggestions. Ce qui nous intéresse ici c'est de souligner les points suivants:

1. Il existe des possibilités logiques pour essayer de comprendre les régularités quantiques avec le langage classique. Les conclusions de Bohr ne sont pas contraignantes d'un point de vue logique.
2. Bien qu'il puisse se trouver des arguments à posteriori pour critiquer toutes les

¹⁰⁶ Paty, M.; Hoffmann, B.; **L'étrange Histoire des Quanta** (Editions du Seuil, Paris, 1981) p.220

¹⁰⁷ Voir par exemple Jammer, M.; **The Philosophy of Quantum Mechanics** (John Wiley & Sons New York, London, 1974) Chap.7

¹⁰⁸ Voir par exemple Réf. (107) Chap.9

suggestions précédentes, surtout à la lumière des données récentes sur la non-séparabilité, à l'époque où Bohr arriva à ses conclusions il n'y avait pas, d'un point de vue logique, de raisons pour écarter les suggestions en question. Il existait, il est vrai, un théorème de Von Neumann qui soutenait l'impossibilité de compléter causalement la mécanique quantique, à partir de quelques hypothèses générales sur la structure mathématique de la théorie quantique - théorème qui postérieurement fut contesté n'étant pas assez général pour interdire toutes les possibles théories déterministes - mais ce théorème n'a pas vraiment joué un rôle important sur la pensée de Bohr, ce dernier se limitant à exprimer son admiration et à dire qu'un des ses articles arrivait à la même conclusion par des voies plus élémentaires.¹⁰⁹

3. Nous avons dit que le caractère de totalité des processus atomiques et l'indivisibilité entre l'objet et l'instrument entraînent, pour Bohr, le caractère essentiellement statistique de la mécanique quantique. Cette corrélation entre l'indivisibilité et l'indéterminisme n'est pas, cependant, contraignante d'un point de vue logique. En effet: nous verrons au chap. 8 que dans la théorie de Bohm, qui est une théorie causale se trouve, néanmoins, un aspect de totalité.

4. Comme nous l'avons montré Bohr était déjà convaincu de la nécessité de renoncer à une explication classique de l'existence de h , bien avant les découvertes fondamentales de Heisenberg et Schrödinger. Doit-on conclure qu'il s'agissait d'un choix de Bohr?

Faut-il s'étonner de cela?

Voyons. Selon Petersen¹¹⁰ Bohr a affirmé avoir toujours pensé aux grandes corrélations, et cela dès sa jeunesse, avant ses découvertes en physique. Il est naturel donc qu'un savant comme Bohr ait choisi dans un éventail de possibilités métaphysiques celle qui était plus en accord avec sa psychologie et son éducation. Cette orientation peut se faire d'une façon inconsciente et les découvertes dans la science peuvent confirmer le savant dans son choix ou, au contraire, l'obliger à un changement. Il est alors légitime que nous tentions de cerner les possibles préférences métaphysiques de Bohr et les influences philosophiques éventuelles sur sa pensée, sans oublier le grand succès qu'il a obtenu avec ses théories physiques qui l'a confirmé dans ses convictions sur la nature de la physique, et en prenant en compte le fait que, comme le note Max Jammer:

"(...) les considérations philosophiques dans leur effets sur l'esprit du physicien agissent plutôt comme un courant souterrain que comme une ligne de conduite bien définie."¹¹¹

Dans le chapitre précédent nous avons vu que Bohr ne présente pas des arguments suffisants pour étayer ses opinions sur le langage courant. L'on peut affirmer donc qu'il s'agit d'un choix de Bohr.

Au sujet de son interprétation des faits quantiques il est possible d'identifier deux

¹⁰⁹ Proceeding of the International Conference: New Theories in Physics, Warsaw (1938) Institut International de Coopération Intellectuelle, Paris, (1939). Cité par Selleri, F, **Le grand débat de la théorie quantique**, (Flammarion 1986) Chap. 2.

¹¹⁰ Petersen, A; "The Philosophy of Niels Bohr" **Bulletin of the Atomic Scientist** 19, 1963 p.8-14

¹¹¹ Jammer, M; **The Conceptual Development of Quantum Mechanics** (Mc Graw Hill, New York, 1974) p.166

points que nous pouvons considérer comme les aspects fondamentaux dans sa métaphysique:

1. *L'incompréhensibilité de la mécanique quantique* du point de vue de la mécanique classique. Pour un penseur rationaliste comme Popper:

"Bohr essaya d'expliquer cette incompréhensibilité, c'est-à-dire de rendre compréhensible l'incompréhensibilité."¹¹²

2. *Le renoncement irrévocable au déterminisme classique.*

Les éventuelles influences (probablement importantes) des courants philosophiques de l'époque sur la pensée de Bohr ont été étudiées par Jammer¹¹³ et Holton¹¹⁴. A propos des deux aspects mentionnés ci-dessus nous pensons qu'il pourrait s'agir d'une influence de Hoffding et Kierkegaard sur Bohr. Nous analyserons brièvement cette possibilité en prenant comme base les études de Jammer et Holton.¹¹⁵

Les faits suivants témoignent de la relation étroite qui existait entre Hoffding et Bohr:

i) Hoffding fréquentait la maison du jeune Bohr pour discuter sur la philosophie avec le père de Bohr. Le jeune Bohr avait la permission d'écouter les discussions qui, selon lui même, exercèrent une influence sur lui.¹¹⁶

ii) Bohr entra à l'université en 1903 et suivit rapidement le cours de Hoffding en Histoire et Philosophie de la Logique. Une amitié de toute la vie se développa entre les deux et dans ses lettres à Hoffding, Bohr affirme avoir trouvé dans les livres du premier des idées qui l'ont aidé à "comprendre" son travail.¹¹⁷ Egalement, dans un article écrit en 1928 à l'occasion du 80ième anniversaire de Hoffding, Bohr reconnut l'impact des idées de Hoffding sur son travail et en particulier sur sa recherche d'une interprétation appropriée du formalisme de la mécanique quantique.¹¹⁸

Au sujet de l'éventuelle influence de Kierkegaard sur Bohr il est connu que:

i) Hoffding était l'un de plus prestigieux commentateurs et disciples de Kierkegaard.

ii) En 1909 Bohr envoya comme cadeau d'anniversaire à son frère Harold le "Etapas sur le Chemin de la Vie" de Kierkegaard avec une lettre dans laquelle il louait beaucoup le livre en ajoutant néanmoins qu'il ne partageait pas toutes les idées de Kierkegaard.¹¹⁹

¹¹² Popper, K; Préface de: **Le grand débat de la théorie quantique** Selleri, F; (Flammarion, 1986)

¹¹³ Réf. (111)

¹¹⁴ Holton, G; "Les Racines de la Complémentarité" dans **L'Imagination Scientifique**,(Gallimard, Paris 1981)

¹¹⁵ Sur le climat intellectuel de l'époque qui pourrait avoir favorisé l'interprétation acausale de la mécanique quantique et le renoncement à expliquer classiquement les lois quantiques voir Forman,P; **Weimar Culture, Causality and Quantum Theory (1918-1927)** Historical Studies in the Physical Science,(Univ. of Pennsylvania Press, 1971) Vol. 3

¹¹⁶ Rozental, S; Ed. **Niels Bohr, His life and Work as seen by his friends and colleagues.** (North-Holland, Amsterdam, 1968.) p.13

¹¹⁷ Réf. (114) p. 113

¹¹⁸ Réf. (111) p. 349

¹¹⁹ Réf. (114) p.114 - 115

Les conceptions de Kierkegaard qui peuvent être revendiquées comme ayant eu une possible influence sur Bohr sont les suivantes

Les conceptions contradictoires de la vie

Les contradictions de la vie sont rigides et insurmontables, et si nettement opposées entre elles qu'il nous faut opérer un choix parmi elles.

La nécessité d'un choix dans la vie

La vie de l'homme est une série de décisions, de "sauts" soudains, qui ne sont ni prédits ni déterminés par ses antécédents. Selon Hoffding, Kierkegaard est:

"(...) le seul penseur indéterministe qui essaie de décrire le saut"¹²⁰

Kierkegaard insiste sur la discontinuité entre incompatibles, sur le "saut" plutôt que sur la transition graduelle.

Antithèse entre pensée et réalité

Kierkegaard insiste sur l'idée que la pensée ne peut jamais atteindre la réalité puisque dès que la pensée croit avoir atteint la réalité elle la falsifie en la transformant en réalité imaginée. Entre pensée et réalité il y a une ligne qui ne peut pas s'effacer.

Kierkegaard s'opposait à la construction de systèmes et insistait sur la valeur pragmatique de la pensée.

La délimitation entre subjectif et objectif est arbitraire

La philosophie spéculative traditionnelle, en prétendant tout expliquer, oublie que le créateur du système, aussi peu important qu'il soit, fait partie de ce qu'il veut expliquer. L'homme ne peut pas se considérer comme un observateur impartial ou impersonnel, il doit toujours rester un participant. La délimitation entre subjectif et objectif est toujours arbitraire.

L'acceptation des grands contrastes, des grands paradoxes, qui ne peuvent pas être résolus

Un trait général de la "dialectique qualitative de Kierkegaard" est celui d'accepter thèse et antithèse, sans passer par une étape intermédiaire dans laquelle la tension se résout en synthèse. Selon Hoffding:

"De plus en plus, Kierkegaard en vint à considérer la capacité à embrasser les grands contrastes et à supporter la souffrance que cela entraîne comme le critère de la valeur et du sublime d'une conception de la vie."¹²¹

¹²⁰ Hoffding, H; **The Problems of Philosophy** (Mac Millan, New York 1905) Cité par Jammer Réf. (111) p.174

¹²¹ Hoffding, H; **A History of Modern Philosophy** (New York, Dover Publications, 1955) Vol. III cité par Holton dans la Réf. (114) p.117

Pour terminer nous devons affirmer que l'esprit avec lequel nous faisons cette analyse est très bien décrit par Holton de cette manière:

"Il serait aussi absurde qu'inutile d'essayer de démontrer que les conceptions de Kierkegaard ont été directement, et en détail, traduites par Bohr de leur contexte théologique et philosophique dans le contexte de la physique. Naturellement, il n'est en rien. Tout ce qu'on peut se permettre est de lire sans préjugé Kierkegaard et Hoffding, avec les yeux de quelqu'un qui est d'abord un physicien -luttant, comme le fit Bohr d'abord en 1912-1913 avec ses modèles atomiques, puis à nouveau en 1927- pour 'découvrir une certaine cohérence dans les idées nouvelles' en méditant sur les demandes résolument conflictuelles, paradoxales, insolubles de la physique classique et de la physique quantique, et qui faisaient le désespoir de la plupart des physiciens de l'époque."¹²²

¹²² Réf. (114) p.118

CHAPITRE 4

LE MODE COMPLEMENTAIRE DE DESCRIPTION

A la fin du dernier chapitre nous avons présenté le paradoxe quantique. Dans ce chapitre nous verrons la façon dont Bohr propose de le résoudre. Etant donné que nous ne pouvons pas expliquer les régularités quantiques d'une manière exempte d'ambiguïté avec l'usage normal du langage courant et que, néanmoins, ce langage commun est le seul qui permet d'arriver à la non-ambiguïté, Bohr introduit une nouvelle manière de l'employer. Il s'agit du mode complémentaire de description ou plus simplement de la complémentarité qui consiste en une nouvelle relation logique entre les concepts du langage courant.

La complémentarité est proposée comme un développement rationnel du langage commun, comme une manière d'amplifier ce cadre conceptuel de telle façon qu'il soit possible d'exprimer des expériences qui sont hors du champ de validité du langage courant sans avoir besoin d'abandonner celui-ci.

4.1. LA COMPLEMENTARITE. EXPERIENCES MUTUELLEMENT EXCLUSIVES.

Nous avons étudié dans le chapitre précédent les caractères de totalité et d'indivisibilité que l'existence du quantum d'action h confère, selon Bohr, aux processus atomiques. Il voit une conséquence de ces caractères dans le fait que les diverses mesures sur un objet quantique impliquent des dispositifs expérimentaux mutuellement exclusifs.

"Quand cette condition (que l'action mise en jeu soit grande par rapport au quantum d'action h) n'est pas remplie, nous ne pouvons négliger l'interaction entre l'instrument de mesure et l'objet observé, d'où résulte que les diverses mesures, qui seraient nécessaires pour une description mécanique complète des phénomènes, impliquent des dispositifs expérimentaux qui s'excluent mutuellement."¹²³

En conséquence, il n'est pas possible, dit Bohr, de rassembler des informations sans prendre en compte les conditions expérimentales dans lesquelles ces informations ont été acquises:

"(...) l'interaction entre objets atomiques et instruments de mesure est une partie inséparable des phénomènes quantiques. C'est pourquoi des informations acquises dans des conditions expérimentales différentes ne peuvent pas être rassemblées à la manière habituelle, et la nécessité de tenir compte des conditions sous lesquelles ces informations ont été acquises conduit immédiatement à la forme de description complémentaire."¹²⁴

Les informations sur un objet quantique ne peuvent pas, d'après Bohr, être englobées en une seule représentation. Il propose de les considérer comme *complémentaires*. Dans quel sens?

"(...) tout essai de subdivision du phénomène exigera un changement du dispositif

¹²³ P, p.7

¹²⁴ P, p.x

expérimental qui introduira entre les objets et les instruments de mesure de nouvelles possibilités d'interactions non contrôlables en principe: c'est cette circonstance qui donne son expression à l'individualité des effets quantiques typiques. Par conséquent, les résultats obtenus dans des conditions expérimentales différentes ne peuvent être englobés en une seule représentation, mais doivent être considérés comme complémentaires en ce sens que, seule, la totalité des phénomènes épuise l'information possible sur les objets."¹²⁵

"Des informations obtenues sur le comportement d'un seul et même objet atomique dans des conditions d'expérience chaque fois bien définies, mais s'excluant mutuellement, peuvent, néanmoins, suivant une terminologie courante en physique atomique, être dites complémentaires : bien qu'il soit impossible de les rassembler en une image unique décrite à l'aide des concepts de la vie journalière, elles représentent chacune des aspects également essentiels de tout ce que l'on peut apprendre en ce domaine sur l'objet en question."¹²⁶

Les phénomènes définis par des expériences s'excluant mutuellement, il les appelle complémentaires:

"(...) l'étude des phénomènes complémentaires exige des dispositifs expérimentaux s'excluant mutuellement (...)"¹²⁷

"(...) le caractère d'exclusion mutuelle des conditions expérimentales où apparaissent les phénomènes complémentaires (...)"¹²⁸

Bohr présente plusieurs exemples de phénomènes complémentaires dans lesquels on peut voir qu'il identifie la réalité avec ce qui est en principe observable. Nous verrons plus loin que cette identification a pour origine chez Bohr le caractère de totalité que, selon lui, l'existence de h confère aux phénomènes quantiques et sa thèse de l'unicité du langage courant. Un des exemples de phénomènes complémentaires présentés par Bohr est celui de la trajectoire des particules telles que l'électron et les effets d'interférence de l'onde associée. Après avoir fait l'analyse théorique d'un phénomène d'interférence au moyen d'un dispositif muni de deux diaphragmes, l'un d'eux à deux fentes (voir chapitre 3) Bohr conclut:

"(...) c'est seulement le fait que nous nous trouvons devant un choix; suivre la trajectoire de la particule, ou bien observer des effets d'interférence, qui nous permet d'échapper à la conclusion paradoxale que le comportement d'un électron, ou d'un photon, dépendrait de la présence, dans le diaphragme, d'une fente à travers laquelle il serait possible de prouver qu'il n'est pas passé. Nous avons ici un exemple typique de la façon dont les phénomènes complémentaires apparaissent dans des conditions expérimentales exclusives l'une de l'autre(...)"¹²⁹

Il faut préciser que dans la citation précédente l'emploi fait par Bohr du mot "suivre" pour se référer à la trajectoire de l'électron est ambigu et peut donner l'idée qu'il parle

¹²⁵ P, p.59

¹²⁶ P, p.38

¹²⁷ P, p.60

¹²⁸ P, p.70

¹²⁹ P, p.69 (Souligné par Bohr lui-même)

d'une trajectoire qui sera suivie par l'électron indépendamment de si elle est ou non observée. Le sens de l'expression ambiguë de Bohr est plutôt que nous nous trouvons devant un choix: déterminer par quelle fente passent les électrons et donc parler d'une trajectoire de ceux-ci, ou bien observer les effets d'interférence.

Un autre exemple parmi les phénomènes complémentaires qu'il présente est celui des états stationnaires d'un atome et l'analyse des mouvements intra-atomiques ou les lois de stabilité atomique et la fixation des coordonnées spatio-temporelles d'un électron dans un atome.

"(...) des observations sur le comportement d'objets atomiques, faites à l'aide de dispositifs expérimentaux différents, ne pourront généralement pas être rassemblées à la manière habituelle de la physique classique. En particulier toute expérience ayant pour but de fixer les coordonnées d'espace et de temps d'un électron dans un atome impliquera inévitablement entre l'atome et les instruments de mesure un échange incontrôlable, en principe, d'impulsion et d'énergie, qui annihilera complètement les remarquables lois de stabilité atomique dues au quantum d'action. Inversement toute recherche de pareilles lois, dont l'énoncé même implique la conservation de l'énergie et de l'impulsion, nous imposera, en principe, de renoncer à localiser dans l'espace et le temps les électrons individuels de l'atome."¹³⁰

"C'est ainsi qu'il existe entre l'usage univoque du concept d'état stationnaire et l'analyse mécanique des mouvements intra-atomiques une même relation de complémentarité qu'entre la théorie des quanta de lumière et celle du rayonnement électromagnétique. En effet, toute tentative pour suivre dans le détail le cours d'un processus de transition entraînerait entre l'atome et l'instrument de mesure un échange incontrôlable d'énergie qui perturberait complètement le transfert d'énergie que l'on voudrait analyser"¹³¹

Les caractéristiques des phénomènes complémentaires, à savoir: leur exclusion mutuelle et la nécessité de les employer l'un et l'autre pour épuiser toute l'information définissable sur un objet quantique, Bohr les décrit dans des citations telles que les suivantes:

"Une des caractéristiques les plus remarquables de la physique atomique est la relation toute nouvelle qu'elle établit entre des phénomènes observés dans des conditions expérimentales dont la description exige des concepts élémentaires différents. Quelque contradictoires que puissent paraître ces expériences lorsqu'on essaie de représenter le cours des processus atomiques selon les méthodes classiques, il faut les considérer comme 'complémentaires' en ce sens qu'elles représentent des systèmes atomiques, une connaissance également essentielle, et qu'ensemble elles épuisent cette connaissance."¹³²

"Quelque différents que soient les phénomènes atomiques observés dans des conditions expérimentales différentes, on peut les dire complémentaires en ce sens que chacun d'eux est bien défini et que, dans leur ensemble, ils épuisent

¹³⁰ P, p.26

¹³¹ P, p. 6-7

¹³² P, p.111 - 112

toute connaissance définissable des objets considérés."¹³³

"Pour désigner la relation qui existe entre des phénomènes observés sous des conditions expérimentales différentes, on a introduit le terme de complémentarité, afin de rappeler que c'est seulement par leur ensemble que de tels phénomènes épuisent la totalité des renseignements définis que l'on peut avoir sur des objets atomiques."¹³⁴

La totalité et l'indivisibilité associées à h , selon Bohr, ne permettent de définir un concept qu'au moyen d'une expérience concrète:

"(...) il y a exclusion mutuelle entre *les conditions qui permettent de se servir sans ambiguïté des concepts* d'espace et de temps d'une part et, de l'autre des lois dynamiques de conservation."¹³⁵

"En fait, la commutativité limitée des symboles par lesquels de telles variables sont représentées dans le formalisme quantique correspond à l'exclusion mutuelle *des arrangements nécessaires à leur définition non-ambigüe*. Dans ce contexte, nous ne sommes pas, bien entendu, concernés par une restriction de la précision des mesures, mais par *une limitation de l'usage bien défini des concepts d'espace et de temps et des lois dynamiques de conservation*."¹³⁶

"(...) la représentation formelle des quantités physiques par des opérateurs non commutatifs exprime directement les relations *d'exclusion mutuelle entre les opérations par lesquelles les quantités physiques respectives sont définies et mesurées*."¹³⁷

"(...) une phrase telle que 'nous ne pouvons connaître à la fois l'impulsion et la position d'un objet atomique' pose immédiatement des questions sur la réalité physique de tels attributs de l'objet, et ces questions ne peuvent trouver de réponse que si l'on se réfère aux conditions nécessaires à un usage non-ambigu des concepts d'espace et de temps d'une part, et de l'autre des lois dynamiques de conservations".¹³⁸

La prescription de Bohr de ne définir un concept qu'au moyen d'une expérience concrète, nonobstant son caractère instrumentaliste, a pour origine la totalité conférée aux processus atomiques par l'existence du quantum d'action h . En réfléchissant sur des citations telles que celles que nous avons présentées auparavant on peut exprimer le raisonnement de Bohr -qui l'amène de l'existence de h à la complémentarité - de la manière suivante. Bien qu'en physique classique, la définition des concepts soit opérationnelle, une fois définis, il est possible de les attribuer aux objets- mêmes. C'est ainsi que l'on considère qu'un objet classique a une position et une impulsion, et aucune raison n'empêche d'attribuer une position à l'objet lors d'une opération de mesure de son impulsion et vice versa. Dans un phénomène quantique, par contre, nous ne pouvons pas considérer l'objet comme séparé de l'instrument de mesure. Le phénomène a un caractère d'individualité dû à l'existence de h , ce qui nous amène à le concevoir comme une totalité, y

¹³³ P, p. 136 (Souligné par J.R. CH.)

¹³⁴ P, p.151

¹³⁵ P, p.110 (souligné par J.R.CH.)

¹³⁶ E, p.5 (souligné par J.R.CH.)

¹³⁷ E, p.61 (souligné par J.R.CH.)

¹³⁸ P, p.60

compris le dispositif expérimental:

"Il est en effet plus correct (...) de ne se servir du mot phénomène que pour rapporter des observations obtenues dans des conditions parfaitement définies, dont la description implique celle de tout le dispositif expérimental"¹³⁹

Nous ne pouvons, par conséquent, définir l'usage et le sens d'un concept que dans le contexte d'un phénomène précis.

La totalité des phénomènes a pour conséquence, d'autre part, l'existence d'expériences mutuellement exclusives. Il s'agit d'expériences que nous ne pouvons pas réaliser en même temps. Plus précisément, il n'est pas possible de construire un dispositif qui permette de les rendre simultanées. Les concepts définis au moyen de deux expériences qui s'excluent mutuellement ne peuvent pas être rassemblés dans une représentation globale. Pour cela, il devrait être possible de construire un dispositif pour définir les deux concepts en même temps, et ce n'est pas le cas. Cependant, deux concepts qui s'excluent mutuellement sur un même objet quantique, sont tous deux nécessaires pour épuiser l'information définissable sur cet objet. Ils doivent être considérés comme complémentaires.

Nous devons préciser que, à notre avis, l'expression "épuiser toute l'information ou la connaissance définissable" doit être comprise chez Bohr dans le sens d'exprimer tous les types d'information que, en utilisant divers appareils de mesure, nous pouvons recueillir sur l'objet.

Il est important de souligner que la totalité que l'existence de h confère aux phénomènes quantiques n'est pas suffisante à elle seule pour conclure que des concepts tels que onde et particule ne peuvent jouer ensemble dans un phénomène quantique. Les théories du type de Broglie - Bohm, par exemple, permettent de retenir les deux concepts: l'électron est une particule avec une onde associée satisfaisant l'équation de Schrödinger. L'onde détermine un potentiel quantique dont les aspects qualitativement nouveaux expliquent les différences qui existent entre les théories classique et quantique. Un de ces aspects est une totalité que Bohm conçoit comme conceptuellement analysable au moyen de concepts radicalement nouveaux qu'il faut construire. Nous trouvons ici la différence fondamentale entre Bohr et Bohm et la clé finale de la complémentarité.

Bohr considère que la totalité des phénomènes quantiques n'est pas conceptuellement analysable. En effet, sa thèse de l'unicité du langage courant et le fait que celui-ci soit incapable de rendre compte des régularités quantiques l'amènent à la conclusion que l'existence de h est un fait fondamental qui n'admet ni ne requiert d'explication. Il en va, par conséquent, de même pour la totalité et l'indivisibilité des phénomènes quantiques qui dérivent de h . Nous devons accepter également comme inexplicable la prescription de ne définir l'usage et le sens d'un concept qu'au moyen d'un dispositif expérimental concret.

La différence fondamentale entre Bohr et Bohm réside donc dans leurs thèses linguistiques. La critique que l'on peut faire aux théories du type de Broglie - Bohm, du point de vue de Bohr, est que le langage courant ne peut expliquer les phénomènes

¹³⁹ P, p.110

quantiques, et étant donné que ce langage est le seul dont nous disposons et disposerons jamais, tout espoir est vain d'expliquer les phénomènes quantiques.

4.2 UNE DEFINITION PRECISE DE LA COMPLEMENTARITE

Bohr a été souvent critiqué pour n'avoir pas donné une définition précise de l'idée de complémentarité. Einstein a écrit à ce propos que malgré tous les efforts qu'il avait faits il n'était pas parvenu à une formulation précise du principe de complémentarité de Bohr. L'affirmation d'Einstein, non seulement exprime la critique en question, mais illustre la difficulté de trouver une définition que Bohr lui-même n'a nullement présentée explicitement dans ses écrits. Nous croyons pourtant qu'il est possible de définir avec précision la complémentarité si l'on prend en compte les thèses linguistiques de Bohr et ses considérations sur l'impossibilité fondamentale d'analyser l'existence de h et la totalité qu'elle confère aux phénomènes quantiques.

Nous présentons les propositions suivantes comme une définition précise du mode complémentaire de description.

Le sens des concepts

Le sens d'un concept n'est défini qu'au moyen d'une expérience concrète. C'est l'expérience qui décide s'il est possible ou non d'utiliser tel ou tel concept pour décrire l'information obtenue. On n'est pas libre d'utiliser sans restriction le concept ainsi défini pour rendre compte de n'importe quelle autre expérience.¹⁴⁰

Si nous avons, par exemple, un faisceau d'électrons qui passe par deux fentes et arrive sur un écran, le concept d'onde est défini, du fait que la figure d'interférence apparaît. Si nous ajoutons à l'arrangement expérimental un dispositif permettant de savoir exactement par quelle fente passent les électrons, le concept de trajectoire de la particule est maintenant défini, mais l'interférence disparaît. Nous ne pouvons donc plus employer le concept d'onde puisque son sens et son usage ne sont plus définis par cette expérience. Il nous est interdit, non seulement d'utiliser le concept en question pour la description ou le calcul de ce qu'on observe, mais aussi de nous représenter par la pensée le système étudié comme ayant la propriété caractérisée par le concept d'onde.

Un autre exemple est celui d'un dispositif destiné à mesurer la position q d'un électron avec précision (c'est-à-dire, avec $\Delta q=0$). Il est impossible, dans cette expérience, de connaître l'impulsion p de l'électron. Ce dernier concept n'est donc pas défini par cette expérience et, en conséquence, nous ne pouvons pas l'utiliser, ni concevoir l'électron comme ayant une impulsion. Si nous pouvions ajouter un dispositif de mesure d'impulsion qui n'entraverait en rien le fonctionnement du premier, il nous serait possible de concevoir l'électron comme ayant à la fois une position q et une impulsion p précises (c'est-à-dire avec $\Delta q=0$ et $\Delta p=0$); mais c'est justement ce que nous ne nous permet pas de faire la totalité conférée aux phénomènes quantiques par l'existence de h . Réciproquement, si nous avons un dispositif pour mesurer l'impulsion p d'un électron avec précision (c'est-à-dire avec $\Delta p=0$) nous pouvons utiliser ce concept, mais il nous est alors interdit de concevoir l'électron avec une position.¹⁴¹

¹⁴⁰ Il faut souligner que tous les scientifiques seront d'accord pour exiger une définition opérationnelle des concepts. Mais Bohr exige de plus qu'on ne soit pas libre d'utiliser sans restriction un concept défini par une expérience concrète pour rendre compte de n'importe quelle autre expérience.

¹⁴¹ Quand nous mesurons la position ou l'impulsion d'un électron, il y a toujours des incertitudes

Concepts mutuellement exclusifs

Deux concepts sont mutuellement exclusifs s'il n'existe aucune possibilité de définir leur sens au moyen d'une seule expérience. Des concepts mutuellement exclusifs ne peuvent pas être combinés en une seule image conceptuelle. Pour pouvoir le faire on aurait besoin, d'un seul dispositif permettant de les définir.

Les concepts de position précise et d'impulsion précise d'un électron sont des exemples de concepts mutuellement exclusifs.

Concepts complémentaires

Deux concepts seront complémentaires s'ils sont mutuellement exclusifs mais nécessaires l'un et l'autre pour épuiser toute l'information définissable sur un même objet quantique. Pour être plus précis il faut dire que la phrase "épuiser toute l'information définissable" veut dire "exprimer toutes les *types* d'information que, en utilisant divers appareils de mesure, nous pouvons recueillir sur l'objet".

Expériences ou phénomènes complémentaires

Des expériences ou phénomènes complémentaires sont ceux au moyen desquels on définit des concepts complémentaires.

Variables complémentaires

Ce sont celles au moyen desquelles on représente des concepts complémentaires.

Descriptions complémentaires

Deux descriptions d'un même objet quantique sont complémentaires si elles sont faites avec des concepts complémentaires.

Le mode normal de description

C'est la manière d'utiliser le langage courant dans la vie ordinaire et en physique classique quand il est suffisamment raffiné.

Le mode complémentaire de description ou complémentarité

C'est le mode d'utilisation du langage courant au moyen de concepts complémentaires. Nous devons remarquer que ce qui décide, dans le mode complémentaire de description, s'il est possible ou non de combiner deux concepts en une seule image conceptuelle, ce sont les expériences au moyen desquelles l'on définit le sens des concepts en question et l'existence ou non de la possibilité de combiner en un seul les dispositifs de mesure correspondants.

provenant de la complexité de l'opération de mesure. Ces incertitudes cependant, peuvent, en principe être rendues aussi petites que l'on veut, et nous pouvons donc parler-en principe- de la mesure précise des quantités en question.

L'“intérieur” du phénomène et l'“objet” quantique

Maintenant, il est nécessaire d'approfondir la compréhension du sens que nous devons donner au mot "objet". Ainsi que nous l'avons dit au chapitre précédent, on emploie ce vocable d'une façon conventionnelle, et, étant donné que nous devons nous référer à la totalité du phénomène, y compris l'instrument, parler d'un objet en soi et lui attribuer des propriétés indépendantes n'est qu'une convention commode, ce dont nous devons être conscients. Il existe, cependant, d'autres raisons pour employer le mot objet. Bohr affirme que, dans la totalité constituée par un phénomène quantique, une distinction fondamentale doit être faite entre l'objet de recherche et l'instrument de mesure. Nous pouvons voir sans peine que cette distinction est une exigence logique dans le cadre des idées de Bohr. En effet, étant donné que les résultats de mesure doivent être exprimés (par le langage courant) dans le mode normal de description, il faut bien qu'un aspect au moins de la totalité soit décrit par ce mode normal. Cet aspect ou élément est l'instrument. Celui-ci, ainsi que les résultats sont, donc, décrits par le mode normal de description. Le reste de la totalité, que nous pouvons appeler l'"objet", ne peut pas être décrit dans le mode normal, car le langage courant tel que nous l'employons en physique classique est incapable de rendre compte des régularités quantiques. Ces dernières constituent précisément l'information que l'on obtient au moyen de l'instrument. Pour éluder le paradoxe quantique - contenu dans le fait précédent - Bohr propose le mode complémentaire de description. L'"objet" doit, en conséquence, être décrit dans ce mode. Nous pouvons comprendre maintenant la logique des idées que Bohr exprime, par exemple, dans les citations suivantes.

"Le point central est ici la distinction entre les *objets* soumis à l'investigation et les *instruments de mesure* qui servent à définir en termes classiques les conditions dans lesquelles apparaît le phénomène"¹⁴²

"L'aspect essentiellement nouveau dans l'analyse des phénomènes quantiques est (...) l'introduction d'une *distinction fondamentale entre les appareils de mesure et l'objet soumis à l'investigation*. Cela est une conséquence directe de la nécessité de rendre compte du fonctionnement des instruments de mesure en termes purement classiques, excluant en principe toute considération du quantum d'action. Les aspects quantiques du phénomène, d'autre part, sont révélés par l'information sur les *objets atomiques dérivée des observations*."¹⁴³

Par ailleurs l'information sur les objets atomiques est obtenue, souligne Bohr, au moyen des effets irréversibles d'amplification produits dans les instruments :

"L'unique information que nous recevons des objets atomiques, ce sont les traces que ces derniers ont laissées sur les instruments de mesure, comme par exemple l'empreinte d'un électron sur une plaque photographique, placée dans l'appareil. Le fait que ces traces soient toujours dues à des effets d'amplification irréversibles donne aux phénomènes un caractère spécifique de clôture définitive, qui met en évidence l'irréversibilité de principe qui est attachée au concept d'observation."¹⁴⁴

"(...) tout phénomène atomique est "définitivement clos" en ce sens que son observation est fondée sur des enregistrements obtenus au moyen de dispositifs

¹⁴² P, p.73-74 (Souligné par Bohr lui-même)

¹⁴³ E, p. 3-4 (Souligné par Bohr lui-même)

¹⁴⁴ P, p. 150-151

d'amplification au fonctionnement irréversible, tels que les traces permanentes laissées sur une plaque photographique par des électrons pénétrant dans l'émulsion. Il faut se rendre compte que le formalisme de la mécanique quantique ne s'applique de façon bien définie qu'à des phénomènes clos de ce type."¹⁴⁵

L'effet irréversible d'amplification est décrit par Bohr de façon plus explicite dans un échange de lettres avec Pauli au sujet de l'irréversibilité inhérente à une observation.

"(...) il est évident que tout arrangement pratique pour faire des observations, faisant usage soit de plaques photographiques, soit de chambres à bulles, soit d'impressions sensorielles directes, implique dans son fonctionnement un mécanisme dans lequel l'énergie libre est dépensée en quantités hors de proportion avec les échanges d'énergie qui caractérisent les processus atomiques individuels soumis à l'investigation."¹⁴⁶

C'est au moyen de l'effet irréversible d'amplification, explique Bohr, que l'on parvient à obtenir l'information non-ambiguë sur l'objet soumis à l'investigation. Cet effet irréversible d'amplification, appelé par Bohr la "clôture" du phénomène, est donc essentiel pour parvenir à la non-ambiguïté, c'est-à-dire à l'objectivité.

Nous devons remarquer qu'en physique classique, on fait également la distinction entre les appareils de mesure et l'objet que l'on étudie. Cependant, il ne s'agit pas d'une distinction fondamentale, puisque l'appareil et l'objet sont tous deux décrits dans le mode normal de description. En physique quantique, par contre, nous utilisons le mode normal de description pour décrire l'instrument et les résultats, et le mode complémentaire quand nous nous référons à l'objet.

"(...) dans le cadre de la physique classique, il n'y a, en principe, aucune différence entre la description des instruments de mesure et celle des objets sur lesquels porte l'investigation, la situation est essentiellement différente dans l'étude des phénomènes quantiques (...)." ¹⁴⁷

Comme meilleure manière de nous exprimer (toujours en physique quantique) nous proposons de nous référer d'une part à l'instrument et d'autre part à l'"intérieur" du phénomène en considérant l'"intérieur" comme l'aspect du phénomène qui n'est pas directement accessible à nos sens, mais seulement de façon indirecte, à travers les effets irréversibles qui sont produits dans l'instrument.¹⁴⁸ L'information ou l'évidence ainsi obtenue doit être organisée au moyen du mode complémentaire de description. La raison pour laquelle nous proposons d'utiliser le mot "intérieur" pour nous référer à cette face du phénomène qui est différente de l'instrument, est que nous voulons réserver le mot "objet" pour faire référence à l'aspect particulier de l'"intérieur" auquel nous attribuons l'information obtenue dans l'instrument.

¹⁴⁵ P, p.110

¹⁴⁶ Bohr, N.; **Collected Works**, General Editor Erik Rüdinger (North Holland Publishing Company, Amsterdam 1985) Vol 6. p. 326-330.

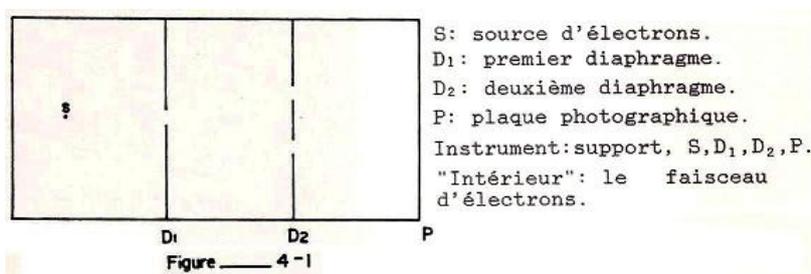
¹⁴⁷ P, p.434

¹⁴⁸ Nous devons souligner qu'en physique classique il y a également des aspects des phénomènes qui ne sont pas directement accessibles à nos sens comme, par exemple, les champs électromagnétiques. Cependant nous employons le langage dans le mode normal pour nous référer aussi bien à ces aspects qu'à l'instrument de mesure. En conséquence nous n'avons pas besoin en physique classique de faire la différence entre l'instrument et l'intérieur du phénomène.

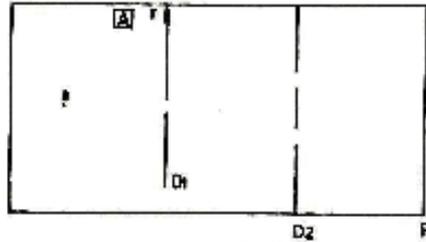
Nous préciserons notre idée dans les paragraphes suivants.

Nous avons vu que, pour Bohr, un phénomène quantique doit être considéré comme une totalité qui comprend l'instrument de mesure. Deux phénomènes sont, en conséquence, chacun une totalité. Une paire de phénomènes complémentaires seront donc une paire de totalités complémentaires. Pourquoi ces deux totalités sont-elles en rapport l'une avec l'autre? Où se trouve la clé de leur relation mutuelle qui fait qu'elles soient précisément complémentaires? Elles doivent avoir quelque aspect en commun. Quelque aspect qui ne change pas et auquel se réfèrent les informations complémentaires. Nous proposons d'appeler "objet" cet aspect commun à deux phénomènes complémentaires qui les rend complémentaires. L'"objet" sera un aspect de l'"intérieur" car les informations obtenues avec l'instrument sont attribuées à l'"intérieur". Deux exemples peuvent aider à préciser l'idée. Nous avons étudié les expériences avec les électrons menées au moyen d'un dispositif muni de deux diaphragmes, l'un d'eux à deux fentes, comme illustration de deux concepts complémentaires: la trajectoire des particules et l'effet d'interférence de l'onde associée. Quel est l'"objet" dans ce cas? Voyons la question. Dans notre exemple, un faisceau d'électron est soumis à deux expériences. Dans l'une d'elles, les deux diaphragmes sont rivés fixement à un support commun; nous obtenons une figure d'interférence nette. Dans l'autre expérience, l'un des diaphragmes est libre de se mouvoir indépendamment du reste de l'appareil; nous pouvons donc préciser la trajectoire des électrons, mais l'interférence disparaît. Dans les deux expériences, il faut d'abord préparer le faisceau. Nous pouvons constater qu'il s'agit bien d'un faisceau d'électrons en mesurant, par exemple, la masse et la charge de chaque particule. Après la préparation, le faisceau est soumis, soit à la première expérience - qui nous permet d'observer l'interférence - , soit à la seconde - qui nous permet de déterminer la trajectoire. L'instrument et l'"intérieur" changent d'une expérience à l'autre. En effet, dans la première, l'"intérieur" n'inclut pas le premier diaphragme: celui-ci est une partie de l'instrument. Dans la deuxième, par contre, le premier diaphragme appartient à l'"intérieur". L'aspect de l'"intérieur" qui reste inchangé et auquel se réfère l'information obtenue dans les deux expériences est le faisceau d'électrons. Ce dernier constitue donc l'"objet" quantique. Les diagrammes suivants illustrent les idées au moyen de dispositifs esquissés en un style pseudo-réaliste.

Expérience A: Observation de l'interférence



Expérience B: Détermination de la trajectoire des électrons.



A: appareil de mesure de l'impulsion de D_1
 ressort fin
 Instrument: support, S, D_2 , P, ressort, A.
 "Intérieur": le faisceau d'électrons et D_1 .

Figure 4-2

"Objet" quantique dans les expériences A et B : le faisceau d'électrons.

Un autre exemple, présenté au chapitre 3 comme illustration des relations de Heisenberg, est celui de la mesure de la coordonnée x d'un électron au moyen d'un microscope. Considérons une première expérience dans laquelle la source de lumière, le microscope et la plaque photographique sont rivés fixement au support. Nous trouvons la coordonnée x avec une précision

$$\Delta x = \frac{h}{\sin \theta}$$

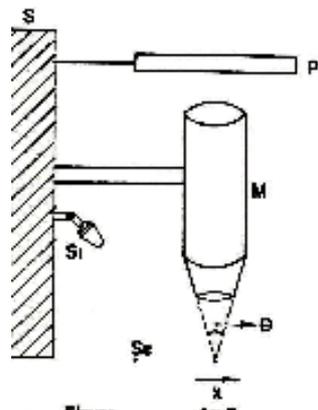
Dans une deuxième expérience conçue pour mesurer l'échange d'impulsion entre l'électron et les photons, le microscope, la source de lumière et la plaque photographique sont libres de se mouvoir. On trouve l'échange d'impulsion avec une précision de l'ordre de

$$p_x = \frac{h}{\lambda} \sin \theta$$

Dans la première expérience, le microscope, la source de lumière et la plaque photographique font partie de l'instrument. Dans la seconde, ils appartiennent à l'"intérieur". Dans les deux expériences les électrons et les photons constituent l'aspect de l'"intérieur" qui demeure constante, mais les informations x et p_x se réfèrent aux électrons. Ces derniers, en conséquence, forment l'"objet" quantique.

Illustrons l'analyse avec deux diagrammes

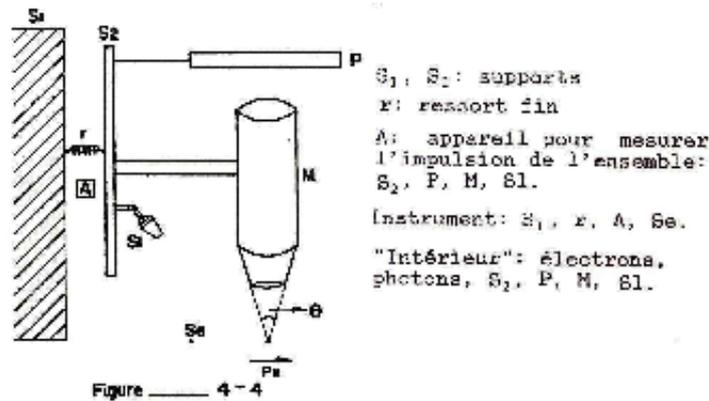
Expérience A : Mesure de x



S: support
 P: plaque photographique
 M: microscope
 S1: source de lumière
 Se: source d'électrons
 Instrument: S, P, M, S1, Se.
 "Intérieur": électrons et photons

Figure 4-3

Expérience B: Détermination de l'échange d'impulsion



S_1, S_2 : supports
 P: ressort fin
 A: appareil pour mesurer l'impulsion de l'ensemble: S_2, P, M, G .
 Instrument: S_1, P, A, G .
 "Intérieur": électrons, photons, S_2, P, M, G .

Aspects constants de l'"intérieur": les électrons et les photons. Aspect constant de l'"intérieur" auquel se réfèrent x et p_x : les électrons. Ces derniers constituent donc l'"objet" quantique.

L'analyse de ces deux exemples nous permet de dire aussi que la "frontière" entre l'"intérieur" et l'instrument a changé dans ces expériences complémentaires et qu'en conséquence cette "frontière" est mouvante.

Ici, nous devons répondre à une objection qui peut se présenter en confrontant la terminologie que nous venons d'utiliser avec nos affirmations du chapitre 1, selon lesquelles Bohr ne fait pas référence à une réalité en soi dans ses analyses des phénomènes quantiques. Il est compréhensible qu'en affirmant que les phénomènes complémentaires épuisent toute connaissance définissable des objets considérés, Bohr peut donner l'impression de se référer au réel en soi avec le mot objet. A cela s'ajoutent des citations telles que la suivante où il parle de la nature et de la description ou connaissance de la nature:

"L'importance de la physique pour la pensée philosophique générale ne vient pas seulement de la contribution qu'elle apporte à notre connaissance croissante de la nature (...)"¹⁴⁹

Les conclusions de Folse¹⁵⁰ sur le réalisme fort de Bohr se basent principalement sur les affirmations de Bohr au sujet des objets quantiques et de la nature.

La question que nous devons aborder ici est la suivante: Par le mot objet Bohr veut-il dire le réel en soi? Une chose doit être, à notre avis très claire à présent. Quand il parle d'objet quantique, Bohr fait référence à une réalité extérieure. Si les concepts complémentaires ne visaient pas un objet extérieur à nous, le mode normal serait suffisant, car tout ce que nous aurions à décrire, ce serait exclusivement les résultats de mesure ou, plus précisément, nos perceptions de ces résultats. Nous voyons donc que pour être utile, le mode complémentaire de description doit se référer à une réalité extérieure à la conscience, et qu'ici, Bohr s'écarte du positivisme pur. Reste à savoir si cette réalité est forte. Pour répondre à cette question, nous devons considérer un

¹⁴⁹ P, p. ix

¹⁵⁰ Folse, H.J. **The Philosophy of Niels Bohr** (North Holland, Amsterdam, Oxford. 1985)

exemple concret. Reprenons celui des deux expériences complémentaires qui définissent les concepts de trajectoire des électrons et d'interférence de l'onde associée. Nous avons proposé d'attribuer au faisceau d'électrons le mot "objet". Il est nécessaire, par conséquent, d'examiner si les électrons peuvent être considérés comme "en soi".

Il est clair que les propriétés des électrons telles que la trajectoire ou l'interférence de l'onde associée ne sont pas "en soi", car elles dépendent du dispositif expérimental. Dernière possibilité: que l'existence soit l'unique propriété en soi de l'électron. En général, peut-on dire qu'un objet quantique a au moins une propriété indépendante qui est son existence même?

Pour répondre à cette question, à laquelle Bohr n'a pas répondu explicitement, nous devons sortir du cadre de la mécanique quantique non-relativiste et rappeler quelques résultats de la théorie quantique de champs¹⁵¹. En électrodynamique quantique les quantités qui décrivent le champ de radiation, telles que l'intensité des champs électrique et magnétique et le nombre de photons, n'ont pas une valeur numérique définie mais sont des opérateurs qui, en général, ne commutent pas. La fonction d'onde de la mécanique quantique est remplacée ici par une entité mathématique plus générale appelée le vecteur d'état, qui est caractérisé par la composition photonique du champ électromagnétique. Or les nombres qui caractérisent cette composition photonique ne commutent pas avec l'intensité du champ électrique ou magnétique. En conséquence, le champ électromagnétique et le nombre de photons sont des variables complémentaires: une expérience qui permet de préciser le nombre de photons est mutuellement exclusive avec une autre qui permet de mesurer avec précision la valeur du champ électromagnétique. Nous ne pouvons donc parler sans ambiguïté du nombre de photons sans faire référence à une expérience physique concrète.

On trouve une situation analogue dans la théorie du champ "électronique" ou "positronique". Un arrangement adéquat pour la mesure de la distribution spatiale de la charge implique une création incontrôlable de paires électron-positron. C'est-à-dire que la distribution spatiale de la charge et le nombre de particules en jeu sont des variables complémentaires.

Bohr lui-même, en se référant aux discussions sur la cohérence de la théorie quantique des champs a écrit

"En effet, un examen détaillé fait en collaboration avec Rosenfeld montra que toutes les prédictions de la théorie (...) peuvent être vérifiées quand l'exclusion mutuelle de la détermination des valeurs des intensités électrique et magnétique et la spécification de la composition photonique du champ est prise en compte de façon adéquate. On rencontre une situation analogue dans la théorie du positron où tout arrangement approprié pour la mesure de la distribution de charge dans l'espace implique nécessairement une création incontrôlable de paires électron-positron."¹⁵²

Dans les exemples considérés, nous ne pouvons pas parler du nombre de particules présentes dans le phénomène sans prendre en compte le dispositif expérimental total. Cette situation est générale, en théorie quantique des champs la particule est une manifestation ou propriété des champs quantiques, et ces derniers sont des opérateurs, des grandeurs

¹⁵¹ Voir par exemple, Heitler,W; **The Quantum Theory of Radiation** (Dover Publications Inc. 3 éd. New York, 1.984)

¹⁵² E, p.62

physiques du même type que p ou q en mécanique quantique non-relativiste. Les particules et les champs sont alors des propriétés. On peut se demander de quoi. Nous pouvons répondre du "vecteur d'état" du vide.

Celui-ci semble être un bon candidat pour représenter le réel en soi. Le vecteur d'état, ou la fonction d'onde de la mécanique quantique non-relativiste, serait ou représenterait la réalité en soi. Cependant, la fonction d'onde n'a pas, pour Bohr, une existence physique réelle:

"Dans le traitement des problèmes atomiques, la manière réellement la plus appropriée de conduire les calculs consiste à utiliser la fonction d'état de Schrödinger, à partir de laquelle les lois statistiques qui gouvernent des observations faites dans des conditions spécifiques peuvent être précisées en termes d'opérations mathématiques définies. On doit reconnaître, cependant, que nous utilisons là un procédé purement symbolique dont les interprétations physiques non ambiguës requièrent en fin de compte une référence au dispositif expérimental complet."¹⁵³

L'analyse précédente des résultats de la théorie quantique des champs nous amène à la conclusion que la particule, et en général l'"objet" quantique, ne sont pas "en soi" dans la pensée de Bohr, et que la réalité extérieure à laquelle il fait référence implicite avec le mode complémentaire de description est une réalité faible.

Nous pouvons maintenant résumer nos idées au moyen des définitions suivantes qui doivent s'ajouter à celles du début de la section.

Le phénomène quantique

C'est une totalité indivisible dans laquelle il faut faire une distinction fondamentale entre l'instrument et le reste du phénomène. L'instrument et le reste du phénomène ne peuvent pas être conçus comme séparés, une interaction entre eux ne peut pas être définie avec précision. L'aspect de totalité inhérent à un phénomène quantique est révélé par l'existence du quantum d'action h .

Intérieur du phénomène

C'est l'aspect de la totalité qui ne peut pas être décrit selon le mode normal de description. Nous pouvons dire qu'il est *structuré selon le mode complémentaire* voulant dire par là que toute l'information que l'on obtient de l'"intérieur" doit être organisée selon le mode complémentaire de description. L'"intérieur" se manifeste dans l'instrument au moyen des effets irréversibles d'amplification.

Objet quantique

C'est l'aspect de l'"intérieur" qui reste constant entre deux phénomènes complémentaires et auquel se réfèrent les concepts complémentaires.

¹⁵³ E, p.5

L'instrument

C'est l'aspect de la totalité dans lequel l'"intérieur" se manifeste. L'instrument et l'"intérieur" se distinguent fondamentalement en ce que le premier doit être décrit dans le mode normal de description afin de parvenir à l'objectivité, alors que le second est décrit dans le mode complémentaire.

Frontière mouvante entre l'intérieur et l'instrument

Entre deux phénomènes complémentaires, l'instrument et l'"intérieur" changent, tandis que l'"objet" demeure constant. La "frontière" entre l'instrument et l'"intérieur" change, et c'est ce qui nous amène à parler de "frontière" mouvante. Il faut souligner qu'il ne s'agit pas d'une frontière au sens classique, laquelle ne pourrait être invoquée que si l'on avait la possibilité de définir avec précision une interaction entre l'instrument et l'"intérieur", et cela ne se peut, étant donné la totalité inhérente au phénomène quantique.

4.2.1. Caractère "faible" de l'instrument. Extension de la complémentarité aux objets macroscopiques.

Nous avons vu que ni l'"intérieur", ni l'"objet" quantique n'ont une réalité forte. Ce sont les conditions expérimentales qui les définissent. En rappelant les exemples d'expériences conçues avec des électrons nous pouvons voir facilement que l'instrument et, en général, les corps macroscopiques ne sont pas non plus chez Bohr des objets en soi. Dans une des expériences que nous avons examinées, un diaphragme devient un aspect de l'"intérieur" du phénomène; dans une autre expérience ce sont un microscope, une source de lumière, un plaque photographique et un support qui deviennent, ensemble, des aspects de l'"intérieur". Ce sont les conditions expérimentales qui, pour Bohr, déterminent si un objet macroscopique impliqué dans un phénomène quantique doit être considéré comme une partie de l'instrument ou comme un aspect de l'"intérieur" du phénomène.

Nous avons dit au chapitre 3 qu'à la limite où l'action mise en jeu dans un phénomène est grande par rapport au quantum d'action, il est possible de faire une description causale au sens classique, ou, en d'autres termes d'employer le mode normal de description; et que, d'autre part, la frontière entre les théories classique et quantique - c'est-à-dire entre le mode normal et le mode complémentaire de description - ne coïncide pas avec celle qui sépare le microscopique du macroscopique.

Une conséquence logique du fait précédent est que le mode de description que nous devons employer pour nous référer à un corps *macroscopique* sera déterminé par l'action mise en jeu, c'est-à-dire par l'expérience dans laquelle intervient le corps. Si dans certaines circonstances expérimentales l'action mise en jeu par rapport au corps est beaucoup plus grande que h , le corps sera décrit dans le mode normal. Si dans d'autres circonstances expérimentales l'action mise en jeu par rapport au corps est, par contre, de l'ordre de h , le corps devra être décrit dans le mode complémentaire. Ainsi, par exemple, si le corps est employé dans une expérience quantique comme partie de l'appareil de mesure, il doit être décrit dans le mode normal. La même chose s'applique dans les expériences classiques et dans les circonstances de la vie ordinaire où les actions mises en jeu dans notre interaction avec les corps macroscopiques sont beaucoup plus grandes que h .

Néanmoins si le corps macroscopique est employé dans une expérience quantique et

si l'action en jeu par rapport à lui est de l'ordre de h , le corps doit être considéré comme faisant partie de l'"intérieur" d'un phénomène quantique et décrit dans le mode complémentaire.

Les expériences dans lesquelles un corps macroscopique est décrit dans le mode normal sont mutuellement exclusives avec celles où le corps est décrit dans le mode complémentaire. Les deux modes de description sont, cependant, nécessaires pour épuiser toute l'information possible sur le corps. Nous avons affaire, en conséquence, à une extension de la complémentarité aux objets macroscopiques.

Nous devons préciser, que Bohr lui même n'a pas fait une référence explicite dans ces essais à une telle extension de la complémentarité aux objets macroscopiques; mais, comme nous venons de le voir, elle découle logiquement de ses idées. C'est ainsi ce qu'exprime Shimony dans son analyse de ce même point:

"La logique interne de sa position demande l'application de la complémentarité aux instruments de mesure macroscopiques."¹⁵⁴

Nous discuterons dans le chapitre 6 des implications que cette application de la complémentarité entraîne pour le concept de la réalité de Bohr.

4.2.2. La complémentarité dans la physique classique

Dans la physique classique Bohr propose l'emploi du mode complémentaire de description comme solution au problème fondamental de la mécanique statistique.

Le problème

Le problème en question est le suivant: comment est-il possible de réconcilier les phénomènes irréversibles observés dans le domaine macroscopique avec les lois dynamiques réversibles de la mécanique classique?

Pour mieux comprendre la difficulté il est convenable de rappeler brièvement la deuxième loi de la thermodynamique. Nous pouvons formuler cette loi d'une manière simple et générale en disant qu'il existe une fonction de l'état d'un système dynamique complexe, qui s'appelle l'entropie et qui est composée de deux parties: S_e et S_i . Le premier terme représente le flux d'entropie entre le système et l'environnement. Son signe est indépendant du temps. Il ne dépend, en effet, que du sens des échanges avec l'environnement. Le deuxième terme, par contre, est toujours ou positif ou nul et il ne peut que, ou rester constant ou croître avec le temps, c'est-à-dire $\frac{dS_i}{dt} \geq 0$. Une inversion du sens des échanges avec l'environnement ne change pas son signe. Ce terme peut être appelé production d'entropie et il est dû à des phénomènes irréversibles dans le système.

Dans un système isolé - qui n'échange rien avec l'environnement -le flux d'entropie S_e est nul et l'entropie se réduit à S_i .

¹⁵⁴ Shimony, A; "Role of the observer in Quantum Theory" **American Journal of Physics** Vol.31, No. 10, October 1963 p. 755-773

L'on peut formuler la deuxième loi de la thermodynamique par cette proposition: Dans un système isolé l'entropie croît jusqu'à un maximum: $\frac{dS}{dt} \geq 0$ l'égalité correspondant à la situation d'équilibre.

Le problème est donc de trouver la signification dynamique de l'irréversibilité exprimée dans la deuxième loi de la thermodynamique. L'interprétation dynamique la plus simple serait de demander l'existence d'une variable dynamique ayant les propriétés caractéristiques de l'entropie, en particulier la propriété de la variation monotone avec le temps.

Or il existe un théorème d'"impossibilité" de Poincaré ¹⁵⁵ qui affirme qu'aucune fonction des coordonnées et des impulsions des particules composant le système ne peut exister qui ait un signe défini et qui croisse de façon monotone vers un maximum, en évolution Hamiltonienne.

Le théorème de Poincaré implique qu'il est nécessaire d'employer, en plus des concepts mécaniques, d'autres concepts afin de trouver une explication à l'irréversibilité thermodynamique. La mécanique statistique ordinaire fait appel aux concepts de probabilité.

Dans la mécanique statistique l'état d'un système dynamique composé de N particules est représenté par un point dans un espace abstrait de 6N dimensions qui s'appelle l'espace des phases. Les coordonnées de ce point sont d'une part les 3N coordonnées d'espace et d'autre part les 3N coordonnées des impulsions des particules du système. L'évolution temporelle du système est décrite alors par une trajectoire dans l'espace des phases.

Dans la pratique il est impossible de connaître les conditions initiales du système, c'est-à-dire les 6N coordonnées, cependant, nous pouvons représenter le système par un nuage de points qui seront ceux qui correspondent aux différents états dynamiques compatibles avec l'information que nous possédons sur le système. La densité de ce nuage en chaque point de l'espace peut être désignée par une fonction continue p, dont la valeur en un point sera la probabilité de trouver le système autour du point en question. p évolue avec le temps sur l'effet d'un opérateur L qui contient la dynamique du système, c'est-à-dire:

$$\frac{dp}{dt} = Lp$$

Le formalisme que l'on obtient permet de dériver les lois de la thermodynamique.

Il est évident que pour un physicien classique, qui croit à l'objectivité forte et à l'existence d'une réalité physique indépendante, l'explication fournie par la mécanique statistique n'est pas acceptable puisque son acceptation reviendrait à affirmer que l'irréversibilité ne serait que l'expression de notre ignorance. L'accroissement de l'entropie ne représenterait pas le système mais seulement notre connaissance de ce dernier. Ce qui croîtrait constamment serait notre ignorance de l'état du système. Ainsi que l'exprime Prigogine d'une façon assez évocatrice: la combustion qui a lieu dans un fourneau serait le fruit de

¹⁵⁵Poincaré, H; C.R. Hebd. Séances Acad. Sci. 108 1889 p.550-553

l'augmentation de notre ignorance.¹⁵⁶

La solution de Bohr

Bohr propose une complémentarité entre les concepts mécaniques et les concepts thermodynamiques :

"(...) l'irréversibilité thermodynamique (...) ne signifie pas que l'inversion du cours des événements soit impossible, mais plutôt que la prédiction d'une telle réversibilité ne peut faire partie d'aucune description qui implique une connaissance des températures des corps en jeu."¹⁵⁷

"Dans la thermodynamique, comme c'est le cas dans la mécanique quantique, la description contient une limitation essentielle imposée sur notre contrôle des événements et qui est en rapport avec l'impossibilité de parler dans le sens mécanique ordinaire d'un phénomène bien défini. Cette limitation a, bien entendu, une origine très différente dans les deux cas. En effet, dans la thermodynamique statistique nous n'avons pas affaire à un échec des concepts mécaniques pour rendre compte des détails des événements, mais nous devons faire face plutôt à l'incompatibilité d'une telle description détaillée avec la définition de la température. Dans la mécanique quantique, en revanche, nous sommes concernés par l'incompatibilité essentielle entre les lois élémentaires de la stabilité atomique et l'usage des concepts de la mécanique classique sur la base desquels toute mesure doit être interprétée."¹⁵⁸

"Le contraste typique entre la réversibilité des processus mécaniques simples et l'irréversibilité fondamentale de beaucoup des phénomènes thermodynamiques trouve son explication dans le fait que des concepts tels que ceux de température et d'entropie s'appliquent seulement dans des conditions expérimentales incompatibles avec un contrôle exact du mouvement des molécules individuelles."¹⁵⁹

L'essence de l'argument de Bohr est que les expériences qui définissent les concepts mécaniques et celles qui définissent les concepts thermodynamiques sont mutuellement exclusives. On peut se demander maintenant quelles sont les considérations de Bohr qui l'amènent à soutenir cette thèse. Dans ses écrits, Heisenberg décrit l'opinion de Bohr sur l'interprétation de l'irréversibilité d'une façon plus précise que Bohr ne l'avait fait lui-même. Heisenberg relate une conversation qu'il a tenue avec Bohr, Kramers et Klein sur le refus d'Einstein d'accepter le caractère statistique de la mécanique quantique. Au cours de la conversation, Heisenberg fait une comparaison entre la thermodynamique et la mécanique quantique, en soulignant la différence entre les deux théories quant à l'emploi de la statistique. Bohr ne se montrait pas complètement d'accord avec Heisenberg et considérait que la différence avait été exagérée. Rappelant la totalité des phénomènes quantiques et la nécessité de prendre en compte, pour leur définition, tout le dispositif expérimental, Bohr trouvait particulièrement maladroites des expressions telles que "perturbation du phénomène par l'observation."

¹⁵⁶ Prigogine, I., Steinger, I; **La Nouvelle Alliance** (Gallimard, Paris 1979)

¹⁵⁷ Bohr, N; "Chemistry and the Quantum Theory of Atomic Constitution", Faraday Lecture, **Journal of the Chemical Society** 1932 p. 349 - 384

¹⁵⁸ Réf. (157)

¹⁵⁹ P, p.148-149

"Il est vrai, certes, que l'on ne peut plus relier entre eux les résultats d'observations différentes de façon aussi simple que dans la physique antérieure. Mais ce fait ne devrait pas être considéré comme équivalent à une perturbation du phénomène par l'observation; on devrait plutôt parler d'une impossibilité d'objectiver le résultat de l'observation de la même manière qu'en physique classique ou dans l'expérience quotidienne. Des situations d'observation différentes - et par 'situation d'observation' j'entends l'ensemble formé par le dispositif expérimental, la lecture des instruments, etc. - sont effectivement bien souvent complémentaires les unes vis-à-vis des autres; autrement dit, elles s'excluent mutuellement, et ne peuvent pas être réalisées simultanément, et les résultats des uns ne peuvent pas être comparés de façon univoque à ceux des autres. Pour cette raison, je ne vois pas non plus de différence tellement fondamentale entre la situation existant en mécanique quantique et celle qui se présente en thermodynamique. *Une situation d'observation comportant une mesure ou indication de température se trouve également dans une relation d'exclusivité vis-à-vis d'une autre situation d'observation où l'on peut déterminer les coordonnées et les vitesses de toutes les particules participantes. Car la notion de température est définie, précisément, par le degré d'ignorance, concernant les paramètres microscopiques du système, qui caractérise ce que l'on appelle là distribution canonique.* Ou encore, pour nous exprimer moins savamment, disons ceci: Lorsqu'un système composé de nombreuses particules se trouve dans un état d'échange d'énergie permanent avec son environnement ou avec d'autres systèmes macroscopiques, l'énergie de la particule individuelle fluctue constamment, et de même celle du système entier. Mais les valeurs moyennes, pour de nombreuses particules et des temps assez longs, correspondent très exactement aux moyennes sur la distribution normale ou 'canonique'. Tout cela se trouve déjà chez Gibbs. Et une température ne peut être définie, précisément, que par un échange d'énergie. Une connaissance exacte de la température n'est donc pas compatible avec une connaissance exacte des positions et vitesses des molécules.¹⁶⁰

Nous pouvons reformuler le raisonnement de Bohr afin de mieux voir la complémentarité qu'il propose. Considérons deux expériences à cet effet.

Expérience A:

Elle est destinée à faire une description mécanique détaillée d'un système composé d'un grand nombre de particules. Pour faire cela l'on doit mesurer les interactions et déterminer les positions et vitesses de chaque particule en un instant donné que l'on appelle $t=0$. Ensuite le système doit s'isoler de l'environnement. De cette façon nous pouvons connaître à chaque instant le mouvement détaillé de chaque particule en jeu.

Expérience B:

Elle est destinée à connaître la température du système. Dans ce cas le système doit interagir avec le thermomètre jusqu'à ce que l'équilibre thermique soit obtenu. Une fois l'équilibre atteint nous pouvons lire la température sur le thermomètre.

¹⁶⁰ Heisenberg, W.; **La partie et le tout**. 1.972. Albin Michel, Paris p.148 (Souligné par J.R.CH.)

Il est clair que l'on ne peut faire les deux expériences en même temps: dans la première le système doit rester isolé et dans la deuxième, au contraire, il doit échanger de l'énergie avec le thermomètre. Cela veut dire que les concepts mécaniques et le concept de température sont mutuellement exclusifs. Etant donné que les concepts en question sont tous nécessaires pour épuiser l'information définissable sur le système la conclusion est qu'ils sont complémentaires.

L'on peut se demander maintenant si toute l'argumentation précédente ne revient pas, d'une certaine façon, à affirmer l'existence d'une sorte de relation d'incertitude entre la température et l'énergie d'un système. La question, d'après le récit de Heisenberg fut posée à Bohr lui même à propos de l'énergie et la température d'une tasse de thé et il répondit avec ces phrases:

"Si, tout de même, jusqu'à un certain point. Pour se rendre compte de ceci, le mieux est de s'interroger sur les propriétés d'un atome d'hydrogène individuel à l'intérieur du thé. La température de cet atome, si l'on veut bien la considérer, est certainement la même que celle du thé, donc par exemple 70°, puisque cet atome est engagé dans un échange d'énergie complet avec les autres molécules du thé. Mais son énergie fluctue, précisément à cause de cet échange d'énergie. On ne peut donc indiquer pour l'énergie qu'une distribution de probabilité. Si, au contraire, on avait mesuré l'énergie de l'atome d'hydrogène et non la température du thé, cette énergie n'aurait pas permis de faire des déductions précises en ce qui concerne la température du thé; ici encore, c'est seulement une distribution de probabilité que l'on aurait pu indiquer pour cette température. La largeur relative d'une telle distribution de probabilité, donc l'imprécision sur la valeur soit de la température soit de l'énergie, est relativement grande pour un objet aussi petit qu'un atome d'hydrogène, et par conséquent elle est assez frappante. Dans le cas d'un objet plus grand - par exemple, une petite quantité de liquide à l'intérieur de la théière - elle serait proportionnellement beaucoup plus faible et pourrait donc être négligée."¹⁶¹

Sur la similitude entre la situation dans la thermodynamique et la situation dans la mécanique quantique Bohr ajoute dans la même veine:

"Cette ancienne thermodynamique, se comporte vis-à-vis de la thermodynamique statistique à peu près comme la mécanique classique vis-à-vis de la mécanique quantique. Dans le cas d'objets macroscopiques, on ne commet pas d'erreur notable en donnant simultanément des valeurs déterminées à l'énergie et à la température, de même que de tels objets macroscopiques admettent qu'on attribue simultanément des valeurs déterminées à leur position et à leur vitesse. Cependant dans le cas d'objets infiniment petits, cela devient inexact dans les deux cas. De ces objets microscopiques, on a souvent dit jusqu'ici en thermodynamique qu'ils possèdent bien une énergie, mais non une température. Mais je ne suis pas d'accord avec cette manière de s'exprimer, ne serait-ce que parce que l'on ne sait pas exactement où se situe la frontière entre les objets macroscopiques et microscopiques."¹⁶²

La complémentarité entre les concepts thermodynamiques et les concepts mécaniques

¹⁶¹ Réf. (160) p. 149-150

¹⁶² Réf. (160) p.150-151

suggérée par Bohr implique une sorte de totalité dans un phénomène classique. En effet, supposons que nous oublions la mécanique quantique, et que nous suivons la ligne de raisonnement de Bohr. Nous pourrions raisonner de la manière suivante.

Soit une expérience A qui permet de déterminer avec précision l'état microscopique d'un corps. Il n'est possible de mesurer avec cette expérience ni T ni S. Réciproquement, une expérience B conçue pour la mesure de T et de S ne permet pas de connaître l'état microscopique *précis* du corps. Les deux expériences A et B sont incompatibles. Nous ne pouvons pas avoir une expérience C qui permette à la fois obtenir S, T et l'état microscopique *précis* du corps. En conclusion nous ne pouvons nous référer à ces concepts sans faire aussi référence à une expérience concrète. Pour définir T ou S, il est nécessaire qu'il existe une incertitude sur la connaissance de l'état microscopique précis, et pour définir ce dernier nous devons renoncer à connaître les premiers. Etant donné qu'il est impossible de concevoir une expérience dans laquelle l'état microscopique précis et les concepts T ou S jouent ensemble, le problème fondamental de la mécanique statistique disparaît. Nous pouvons dire en plus qu'il existe une sorte de totalité qui ne permet pas de définir les concepts mécaniques et les concepts thermodynamiques sans prendre en compte tout le dispositif expérimental. Cette totalité se manifeste dans le formalisme qui exige une incertitude sur la connaissance de l'état microscopique précis afin de pouvoir définir T et S.

Si l'on accepte les idées de Bohr sur la thermodynamique on trouve également dans un phénomène quantique cette nouvelle totalité que nous pouvons qualifier de *thermodynamique*. En effet, en mécanique classique nous ne connaissons pas, en pratique, l'état microscopique d'un corps et nous sommes obligés d'employer la fonction de densité ρ . De même, en mécanique quantique nous n'avons pas, en pratique, toute l'information possible sur le système et nous ne pouvons pas, en général, assigner un vecteur d'état au système considéré. Cependant, sur la base de l'information partielle qu'on possède, on peut assigner des vecteurs d'état possibles avec une certaine probabilité. Pour faire les calculs, on définit la matrice densité $\hat{\rho}$ qui est l'analogie quantique de la fonction de densité classique ρ . Nous devons ici rappeler brièvement les notions de cas pur et de mélange.

Cas pur

On dit qu'un ensemble E de N systèmes S est un cas pur, si chaque système individuel correspond à un vecteur d'état défini $|\Psi\rangle$ et si tous ces vecteurs d'état sont identiques.

Mélange

On dit qu'un ensemble E de N systèmes S est un mélange si chaque système correspond à un vecteur d'état défini, ce vecteur d'état n'étant pas le même pour tous les systèmes, n_1 systèmes correspondant à un vecteur $|\Psi_1\rangle$, n_2 correspondant à $|\Psi_2\rangle$...

Le mélange peut être caractérisé par l'opérateur

$$\hat{\rho} = \sum_i \frac{n_i}{N} |\Psi_i\rangle \langle \Psi_i|$$

Il se trouve que la valeur moyenne \bar{A} d'une quantité A sur l'ensemble est $\bar{A} = Tr(\hat{\rho} \hat{A})$, où \hat{A} est l'opérateur représentatif de A .

Le cas pur peut se caractériser également par un opérateur

$$\hat{\rho} = |\Psi\rangle\langle\Psi|$$

et la valeur moyenne d'une quantité physique sera

$$\bar{A} = Tr(\hat{\rho} \hat{A})$$

Nous avons dit qu'en général on n'a pas toute l'information en principe possible sur un système quantique. On considère, donc, un ensemble dont les systèmes correspondent tous à des vecteurs d'état $|\Psi_1\rangle, |\Psi_2\rangle, \dots, |\Psi_n\rangle$ sans toutefois pouvoir décider à quel vecteur d'état correspond tel ou tel système particulier. Si la probabilité pour qu'un système appartienne à $|\Psi_i\rangle$ est connue et égale à p_i l'ensemble est un mélange, avec

$$\hat{\rho} = \sum_i p_i |\Psi_i\rangle\langle\Psi_i|$$

Cet usage additionnel de la statistique en mécanique quantique est totalement analogue à l'usage en mécanique statistique classique. Si nous suivons les idées de Bohr sur la complémentarité entre les concepts thermodynamiques et les concepts dynamiques, nous pouvons trouver dans cet emploi additionnel de la statistique le même type de "totalité statistique" que nous avons identifiée dans le cas classique. Il s'agirait d'une totalité qui s'ajoute à celle provenant de l'existence de h . Si nous considérons, en effet, un ensemble microcanonique quantique correspondant à des systèmes d'énergie totale comprise entre E et $E + \Delta$ où $\Delta \ll E$, nous pouvons décrire l'ensemble par une matrice densité ρ qui peut se représenter par

$$\hat{\rho} = \sum_{E < E_n < E + \Delta} |\phi_n\rangle\langle\phi_n|$$

où les $|\phi_n\rangle$ sont des vecteurs propres du Hamiltonien total H correspondant à des valeurs propres E_n comprises entre E et $E + \Delta$ ¹⁶³:

$$H|\phi_n\rangle = E_n|\phi_n\rangle$$

La trace de $\hat{\rho}$ nous donne le nombre d'états compatibles avec l'information que l'on possède sur le système. On définit l'entropie et la température comme

$$S = k \ln(Tr \hat{\rho})$$

et

¹⁶³ Voir par exemple: Huang, K.; **Statistical Mechanics** (John Wiley & Son, Inc., New York. 1.976)

$$\frac{1}{T} = \left[\frac{\partial}{\partial E} k \ln(\text{Tr} \hat{\rho}) \right]_{E=\bar{E}}$$

respectivement. (Réf. 163)

Si l'on connaissait toute l'information dynamique possible sur le système, il conviendrait de considérer l'ensemble statistique formé d'un grand nombre de systèmes ayant tous le vecteur d'état décrivant cette information. Dans ce cas, $\text{Tr} \hat{\rho} = 1$ et nous ne pourrions définir ni T ni S. Nous arrivons, donc, aux mêmes conclusions que dans le cas classique.

La conception générale de Bohr sur la complémentarité entre les concepts dynamiques et les concepts thermodynamiques a été étudiée quantitativement par Rosenfeld et J. Lindhard en a fait une discussion détaillée en prenant en compte l'équilibre statistique, les ensembles microcanoniques et canonique, et leur connexion avec la mesure et les fluctuations de l'énergie et de la température, et il a trouvé par des méthodes formelles une sorte de relation d'"incertitude" pour ces deux concepts, différente des relations de la théorie quantique.¹⁶⁴

Il est très significatif de constater comment Bohr, par ses idées sur le problème fondamental de la mécanique statistique, fut d'une certaine manière un précurseur des travaux de Misra et Prigogine dans ce domaine.

Misra¹⁶⁵ a montré que pour certains systèmes dynamiques il est possible de lever la difficulté que présente le théorème d'impossibilité de Poincaré. A cette fin, Misra considère des objets plus généraux que les fonctions dans l'espace des phases pour construire une quantité qui croisse de façon monotone avec le temps et qui puisse jouer le rôle de l'entropie. Il existe, en effet, une formulation de la mécanique classique dans laquelle les états d'un système ne sont pas représentés par un espace de phases mais par un espace mathématique similaire à celui qui représente les états d'un système quantique, et les variables dynamiques ne sont pas des fonctions dans l'ancien espace des phases mais des opérateurs sur le nouvel espace.¹⁶⁶

Misra trouve que pour certains systèmes, qui possèdent un degré convenable d'instabilité dynamique, il est possible de trouver un opérateur \hat{M} au moyen duquel on peut construire une quantité possédant les propriétés caractéristiques de l'entropie. Cet opérateur, cependant, ne commute pas avec tous les opérateurs qui représentent des variables dynamiques. Cela signifie qu'il existe des systèmes classiques dans lesquels la détermination simultanée de l'entropie et de certaines de ses variables dynamiques est soumise à des relations d'incertitude provenant de la non-commutabilité mentionnée. Ces systèmes possèdent donc des variables complémentaires.

¹⁶⁴ J. Lindhard, "Complementarity between energy and temperature" dans **Lessons of Quantum Theory**, Niels Bohr Centenary Symposium. Copenhagen, Denmark, 3-7 Oct 1.985. (Amsterdam Netherland's North Holland. 1.986). p.99-112

¹⁶⁵ Misra, B; "Nonequilibrium entropy, Lyapounov variables, and ergodic properties of classical Systems" **Proc. Natl. Acad.Sci. USA** 75, 1978 p.1627 1631. Misra, B; Prigogine, I & Courbage, M; **Proc. Natl. Acad. Sec. USA** 76, 1979 p. 3607 – 3611 Misra, B; Prigogine, I & Courbage, M; "Lyapounov variable: Entropy and measurement in Quantum Mechanics" **Proc. Natl. Acad.Sci. USA** 76, 1979 p.4768 - 72

¹⁶⁶ Koopman, B.O; **Proc. Natl. Acad. Sci. USA** 17, 1931 p. 315 – 318 Prigogine, I; **Non-equilibrium Statistical Mechanics** (Wiley Interscience, New York 1962)

Le concept d'entropie ne peut pas se définir par des expériences qui permettent une définition complète de l'état de ces systèmes puisque une telle définition demande la détermination de toutes les variables dynamiques et puisqu'il existe certaines de ces variables qui ne peuvent pas être déterminées simultanément avec l'entropie. Réciproquement une expérience pour définir l'entropie ne permet pas la définition de toutes les variables dynamiques, c'est-à-dire de l'état dynamique de ces systèmes. La description dynamique et la description thermodynamique sont pour ces systèmes des descriptions complémentaires.

Nous voyons, donc, que les résultats des recherches les plus récentes dans le champ de la thermodynamique semblent confirmer les intuitions de Bohr au sujet de l'explication de l'irréversibilité.

Nous devons souligner finalement que les concepts de la thermodynamique et ceux de la dynamique, en tant que complémentaires, doivent être considérés, chez Bohr, comme possédant une réalité faible. Ce sont les conditions expérimentales qui définissent l'emploi, soit des concepts thermodynamiques, soit des concepts dynamiques. Il est nécessaire de prendre en compte le caractère faible de l'irréversibilité dans la discussion sur le processus de mesure que nous ferons dans la section suivante.

4.3. LE PROCESSUS DE MESURE SELON BOHR

Les problèmes associés à la mesure se présentent, si l'on interprète les règles de calcul de la mécanique quantique d'un point de vue réaliste. De ce point de vue les règles quantiques peuvent être exprimées de la manière suivante.

I. Les états quantiques des systèmes physiques sont décrits par des vecteurs d'un espace vectoriel linéaire abstrait ¹⁶⁷

II. Chaque quantité physique appartenant à un système correspond à un opérateur linéaire hermitien agissant sur les vecteurs d'état du système.

III. L'évolution du vecteur d'état d'un système dans le temps obéit à l'équation de Schrödinger dépendante du temps.

IV. Les possibles valeurs définies d'une quantité physique A appartenant à un système ne peuvent jamais être que les valeurs propres a_k de l'opérateur \hat{A} correspondant à A.

V. Si les quantités physiques qui correspondent à un système complet d'opérateurs commutatifs ont toutes des valeurs définies le vecteur d'état du système physique auquel ces quantités appartiennent est le vecteur propre commun à toutes ces valeurs.

VI. À la suite d'une interaction d'un système S avec un appareil de mesure M conçu pour mesurer une quantité A appartenant au système, cette quantité prend une valeur définie. Etant donné un ensemble de systèmes S, ayant pour vecteur d'état $|\Psi\rangle$, la proportion de ces systèmes pour laquelle A prend la valeur a_k à la suite d'une interaction avec M

¹⁶⁷ Etant donné qu'en général, il n'est pas possible d'associer un vecteur d'état à n'importe quel système isolé, le principe I doit se formuler plus précisément en disant qu'il y a des systèmes microscopiques pour lesquels des "états quantiques" peuvent être définis et que de tels états sont décrits par des vecteurs d'un espace vectoriel linéaire.

est $|\langle \phi_k | \phi_k \rangle|^2$, les vecteurs $|\phi_k\rangle$ étant les vecteurs propres de l'opérateur \hat{A} représentatif de A qui correspondent aux valeurs propres a_k de A.¹⁶⁸

VII. ("Réduction" de la fonction d'onde) Immédiatement après une suite de mesures (interactions du système S avec des appareils de mesure) de quantités physiques correspondant à un système complet d'opérateurs commutables, le vecteur d'état du système physique est le vecteur propre $|a_k, b_l, \dots\rangle$ correspondant aux valeurs a_k, b_l, \dots , prises par les quantités physiques auxquelles la suite de mesures a conféré des valeurs définies.

Les principes I à VII pourraient déboucher sur une interprétation réaliste si soit l'une soit l'autre des deux conditions suivantes A ou B soit satisfaite:

Condition A. L'évolution du vecteur d'état qui correspond au principe VI est un cas particulier de l'évolution décrite par le principe III.

Mais il est bien connu que cette condition n'est pas satisfaite en général. En effet, soient $|\phi_n\rangle$ les vecteurs propres de l'opérateur \hat{A} qui représente la quantité A appartenant au système S. Les valeurs propres a_n de \hat{A} sont supposées non dégénérées. Soit M l'appareil conçu pour mesurer A. La mesure est indiquée par la position d'une aiguille sur un cadran de M. Soit G, la position de l'aiguille; \hat{G} l'opérateur représentatif de G; $|n\rangle$ les vecteurs propres de \hat{G} et g_n les valeurs propres (non-dégénérées).

Considérons qu'avant la mesure M est dans l'état $|0\rangle$, - c'est-à-dire que G a la valeur 0 - et S est dans l'état $|\phi_n\rangle$.

Dans un modèle très simple de la mesure on peut supposer que M est conçu de telle façon qu'après l'interaction, il sera dans l'état $|n\rangle$ et S continuera dans l'état $|\phi_n\rangle$.

Après l'interaction entre S et M, la pointe de l'aiguille sera donc dans la position $G=g_n$ qui est en correspondance biunivoque avec la valeur propre a_n de A.

Supposons maintenant que la situation initiale est telle que l'état $|\Phi_i\rangle$ de S est une superposition d'états $|\phi_n\rangle$

$$|\Phi_i\rangle = \sum_n |\phi_n\rangle \langle \phi_n |$$

M étant dans l'état $|0\rangle$.

Selon l'évolution III, après l'interaction le système total sera dans l'état

¹⁶⁸ On suppose que a_k n'est pas dégénérée.

$$|\Psi_f\rangle = \sum_n c_n |\phi_n\rangle |n\rangle$$

mais selon l'évolution VI, l'état final sera un des termes de la somme. Nous voyons donc que les prédictions des deux évolutions ne sont pas en général identiques.

Condition B. VI n'est pas, en général, un cas particulier de III. Cependant, il n'y a aucune différence entre les deux qui puisse, par application des autres principes, entraîner des conséquences observables même "en principe". Pour préciser l'idée, nous devons rappeler la notion de mélange impropre. Dans la définition du mélange que nous avons présentée à la section 4.2, chaque système individuel de l'ensemble était décrit par un vecteur d'état bien défini. Nous disons qu'il s'agit d'un mélange dans le premier sens du mot, ou d'un *mélange propre*.

Mélange impropre

Il est bien connu que certains systèmes n'ont pas de vecteur d'état. Considérons, par exemple, un ensemble E de N systèmes S faits de deux systèmes U et V qui ont interagi l'un avec l'autre dans le passé, et qui, au moment où nous nous situons n'interagissent pas. Nous supposons que chaque système de l'ensemble a un vecteur qui, en général, s'écrit

$$|\Psi\rangle = \sum_{m,n} C_{mn} |U_m\rangle |V_m\rangle$$

où $|U_m\rangle$ et $|V_m\rangle$ sont des suites complètes de vecteurs d'états définis dans les espaces vectoriels correspondant à U et V respectivement. Nous voyons que $|\Psi\rangle$ n'est pas le produit d'un vecteur d'état du système U et d'un vecteur d'état du système V. Il est une combinaison linéaire de tels produits. Il est donc évident qu'il n'est pas possible d'attribuer un vecteur d'état défini à chaque système individuel U et V.

Toutefois il peut être facilement prouvé que la valeur moyenne de n'importe quelle quantité physique A appartenant à U dans l'ensemble E est

$$\bar{A} = Tr(\hat{\rho}' \hat{A})$$

où

$$\hat{\rho}'_{rt} = \sum_j C_{rj} C_{tj}^*$$

Nous voyons, donc, que en ce qui concerne l'ensemble des systèmes U - et en dépit du fait que ces U n'ont pas de vecteurs d'état - une formule existe, qui fournit la valeur moyenne et est identique à celle obtenue précédemment pour un mélange propre. Pour cette raison on donne aussi le nom de mélanges aux ensembles de tels systèmes. Etant donné que les systèmes qui constituent ce nouveau mélange n'ont pas de vecteur d'état, ces nouveaux mélanges sont appelés mélanges dans le second sens du terme ou *mélanges impropres*¹⁶⁹.

¹⁶⁹ d'Espagnat, B; *Conceptions de la Physique Contemporaine* (Hermann, Paris, 1965)

Nous pouvons revenir maintenant à la condition B et la reformuler de la manière suivante. Dans le cas général, quand le système S est dans une superposition d'états, l'évolution III prédit que l'état final du système total S + M sera un cas pur, tandis que l'évolution VI prédit qu'il sera un mélange propre. Mais un cas pur de deux systèmes qui ont interagi dans le passé peut se décrire en ce qui concerne les mesures relatives à l'un d'eux comme un mélange impropre. Alors, si nous n'avons pas la possibilité de différencier les mélanges propres et impropres, les deux évolutions entraîneront les mêmes conséquences observables. La question est donc la suivante: est-il possible de distinguer expérimentalement un *mélange propre* de systèmes S d'un *mélange impropre* de tels systèmes? Il est évident que si l'on choisit de se limiter à des expériences portant sur les seuls systèmes S, ceci est impossible, car la formule qui donne la valeur moyenne de n'importe quelle quantité appartenant à S est la même dans les deux cas. Cependant il n'y a pas de raison de s'imposer une telle limitation et si on l'abandonne il est très facile de trouver des expériences qui permettent de distinguer un mélange impropre d'un mélange propre. En effet, dans le cas d'un mélange impropre les systèmes S qui le composent ont interagi avec d'autres systèmes dans le passé. Si l'on mesure une corrélation entre les valeurs prises par une quantité physique de S et une quantité physique appartenant à ces autres systèmes on trouvera en général des résultats différents selon que les mesures sont effectuées sur un mélange impropre ou sur le mélange propre qui, pour ce qui concerne les mesures faites sur les S seuls, lui est équivalent.

Nous voyons donc qu'il est possible de distinguer entre un mélange propre et un mélange impropre de systèmes S et que, par conséquent la condition B n'est pas soutenable.

Notons en outre que l'existence des deux évolutions heurte les idées du sens commun sur les corps macroscopiques. En effet, l'expression

$$|\Psi\rangle = \sum_n c_n |\phi_n\rangle |n\rangle$$

semble indiquer que l'appareil M est simultanément dans une superposition d'états correspondant chacun à différentes valeurs des positions g_n de la pointe de l'aiguille sur le cadran. Une telle conclusion est en conflit avec la conception du sens commun selon laquelle on considère que les corps macroscopiques ne peuvent avoir simultanément des positions différentes.

d'Espagnat a montré¹⁷⁰ que les solutions proposées à l'heure actuelle au problème de la mesure en invoquant des notions telles que celles de mesure classique, de la complexité des instruments, des propriétés de ces derniers comme l'irréversibilité, ou de mesures dites non-idéales, ne sont que des solutions à objectivité faible.

D'un point de vue purement positiviste, on peut éluder le problème de la mesure en formulant les règles de la mécanique quantique en termes de résultats de mesure sans faire aucune référence au réel en soi, et en considérant comme un fait de l'expérience qu'un objet macroscopique est nécessairement observé en une position définie.

L'expression

¹⁷⁰ d'Espagnat, B.; **Conceptual Foundations of Quantum Mechanics.** (W.A. Benjamin Inc. London. 1976)

$$|\Psi\rangle = \sum_n c_n |\phi_n\rangle |n\rangle$$

signifie, de ce point de vue positiviste, que si on cherche à voir où se trouve la pointe de l'aiguille on a une probabilité $|c_n|^2$ de la trouver à la position g_n . Etant donné notre habileté limitée à étudier expérimentalement des corrélations complexes entre des atomes d'un système macroscopique, le positiviste peut considérer que le cas pur prédit par l'évolution III est, en *pratique indistinguishable* du mélange propre prédit par l'évolution VI.

Une solution qui peut être envisagée pour résoudre le problème de la mesure consiste à considérer que les corps macroscopiques ont un comportement dynamique différent de celui des objets microscopiques. On accepte donc deux principes d'évolution et l'introduction d'un dualisme dans la nature qui exige l'identification d'un critère précis de distinction entre les objets microscopiques et ceux qui doivent être considérés comme macroscopiques. Une solution au sens de cette sorte de dualisme serait de limiter *à priori* l'ensemble d'observables d'un système macroscopique de telle façon que, pour toutes les prédictions physiques, les cas purs et les mélanges propres soient équivalents pour le système¹⁷¹.

Une solution également possible est la création d'une nouvelle théorie à partir de laquelle on pourrait dériver à la fois la théorie quantique pour les objets microscopiques et le comportement classique des objets macroscopiques dont la position est toujours définie.¹⁷²

D'autres solutions proposées sont, par exemple, celles de Wigner¹⁷³ selon laquelle ce sont les consciences qui font la réduction de la fonction d'onde, ou celle d'Everett¹⁷⁴ qui considère qu'il n'y a pas qu'une seule évolution, à savoir celle décrite par le principe III. Cette dernière théorie (au moins dans l'interprétation qui lui est donnée le plus souvent) affirme que chaque fois qu'un processus de mesure a lieu, l'univers réel se divise en autant d'univers réels qu'il y a de valeurs propres distinctes de l'opérateur représentant la quantité mesurée.

Il est possible finalement de considérer que la théorie quantique n'est pas complète et qu'il est possible de lui donner une interprétation causale réaliste, dans laquelle le problème de la mesure ne se présente pas.¹⁷⁵ Mais alors d'autres problèmes se présentent, comme nous le verrons au chapitre 5.

Le réaliste qui considère la théorie quantique comme complète et correcte et qui n'accepte ni la théorie des mondes multiples d'Everett ni la production par les consciences de la réduction de la fonction d'onde, se heurte donc à un sérieux défi avec ce problème de la mesure.

¹⁷¹ Voir par exemple Réf. (170)

¹⁷² Ghirardi, G.C; Rimini, A; Weber, T.; "Unified dynamics for microscopic and macroscopic Systems", **Phys. Rev. D**. Vol.34, No.3, 15 July 1986 p.470-491

¹⁷³ Wigner, E; "Remarks on the Mind-body Questions" in **The Scientist Spéculâtes** I.J. Good éd. (W. Heinemann, London. 1961)

¹⁷⁴ Everett, H "Relative State Formulation of Quantum Mechanics" **Rev. Mod. Phys.** Vol 29 No.3, July, 1967 p.454-464.

¹⁷⁵ Bohm, D & Hiley, B.J.; "An Ontological Basis of the Quantum Theory". **Phys. Rep.** 144 No.6 1.987 p.323 – 375

4.3.1. La mesure selon Bohr

Nous avons montré à la section 4.2. que la fonction d'onde n'a pas pour Bohr une existence physique réelle [voir citation (153)] D'autre part, la complémentarité étendue aux corps macroscopiques montre comme on l'a vu que, pour lui, les propriétés de ces derniers ne sont pas "en soi".

Nous voyons donc que les conditions sous lesquelles se formule le problème de la mesure, à savoir l'interprétation réaliste de la fonction d'onde et la considération des propriétés des corps macroscopiques comme indépendantes, ne sont pas remplies chez Bohr.

Selon ses thèses, une distinction essentielle entre l'instrument et ce que nous appelons l'"intérieur" doit être faite, si l'on veut avoir une expérience. Les actions physiques en jeu par rapport à l'instrument doivent être beaucoup plus grandes que h , afin de pouvoir décrire l'appareil et les résultats dans le mode normal. Si cette condition n'est pas remplie on ne peut avoir une expérience, car pour atteindre à la non-ambiguïté, c'est-à-dire l'objectivité, il est indispensable que l'instrument soit décrit par le langage courant et dans le mode normal.

"Bien entendu, nous restons libres, même en physique atomique, de poser par l'expérimentation des questions à la nature; mais il faut reconnaître que les conditions expérimentales, que nous pouvons modifier de bien des façons, impliquent toujours des corps assez lourds pour que l'on ait le droit de négliger dans leur description le quantum d'action.¹⁷⁶

"(...) les conditions expérimentales peuvent être variées de bien des façons, mais le point essentiel est que nous devons, dans chaque cas, être capables de communiquer à d'autres ce que nous avons fait et ce que nous avons appris, et que le fonctionnement des instruments de mesure doit par conséquent être décrit dans le cadre des idées physiques classiques.

Donc, comme toutes les mesures concernent des corps assez lourds pour que l'on puisse négliger dans leur description le quantum d'action, il ne se présente, à strictement parler, aucun nouveau problème de l'observation en physique atomique."¹⁷⁷

Mais c'est l'expérimentateur qui décide, en principe, si certaines parties des corps "assez lourds" impliquées dans l'expérience font partie de l'instrument ou appartiennent à l'"intérieur". Si, dans une expérience, un corps "assez lourd" c'est-à-dire macroscopique -est dans des circonstances où le quantum d'action ne peut être négligé - c'est-à dire quand les actions physiques en jeu par rapport à lui sont de l'ordre de h -, alors il doit être traité comme "intérieur" d'un phénomène. Nous avons vu, à la section 4.2, deux exemples d'une telle situation.

En se référant à l'expérience à deux fentes dans laquelle le premier diaphragme devient un aspect de l'"intérieur", Bohr écrit:

"Notons en passant qu'il importe peu, à la clarté des considérations précédentes que les expériences qui comportent une mesure précise du transfert d'impulsion ou

¹⁷⁶ P, p.150

¹⁷⁷ P, p.134

d'énergie de particules atomiques à des corps lourds, tels que diaphragmes ou obturateurs, soient pratiquement très difficiles, sinon impossibles. Le seul point décisif est que, dans ces cas, contrairement aux instruments de mesure proprement dits, ces corps forment avec les particules le système auquel doit être appliqué le formalisme de la mécanique quantique."¹⁷⁸

Et après avoir fait une discussion au sujet d'une objection d'Einstein aux relations de Heisenberg, Bohr dit:

"Cette discussion (...) souligne donc une fois de plus la nécessité de distinguer, dans l'étude des phénomènes atomiques, les instruments de mesure proprement dits, qui servent à définir le système de référence, des parties d'appareils qui doivent être considérées comme objets d'investigation et pour lesquels on ne peut négliger les effets quantiques."¹⁷⁹

Nous avons vu également que la clé de la mesure est pour Bohr l'irréversibilité qui est inhérente à l'observation.

"L'amplification des effets atomiques (...) ne fait que souligner l'irréversibilité inhérente au concept même d'observation."¹⁸⁰

Nous pouvons comprendre que l'irréversibilité soit considérée comme inhérente à l'observation si nous analysons un cas concret. Soit une expérience d'interférence avec un faisceau d'électrons qui passe par deux fentes. Supposons que nous voulons déterminer par quelle fente passent les électrons, au moyen d'un dispositif placé en face d'une d'elles.

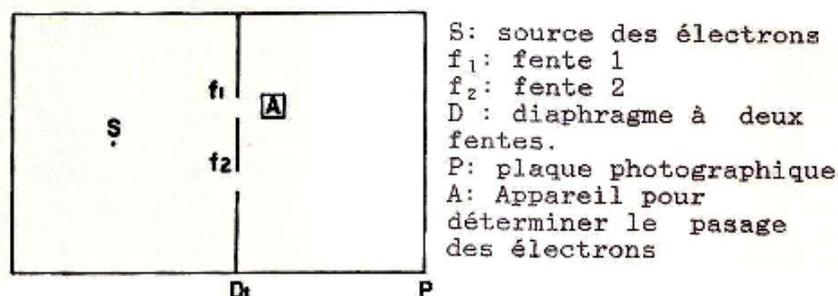


Figure 4-5

Nous savons que si un appareil, tel que A, permet de déterminer si un électron a passé par l'une ou l'autre des deux fentes, l'interférence est détruite. Cette dernière est le résultat de la différence de phase entre l'onde associée à f_1 et celle associée à f_2 . Si nous pouvions avoir un dispositif qui, en effaçant toutes les indications fournies par l'appareil A, remettrait les choses en état au point de faire réapparaître la phase relative entre les deux ondes, nous retrouverions l'interférence. Ce qui interdit la possibilité d'un tel dispositif c'est le fait que le processus qui a lieu dans l'appareil A a un caractère irréversible. Nous voyons donc que les considérations de Bohr sur l'irréversibilité inhérente à la mesure sont bien fondées. Il affirme que c'est l'effet *irréversible* d'amplification qui "clôture" le phénomène. Et c'est seulement à un phénomène "clôturé" que peut s'appliquer le formalisme quantique (voir citations (22) et (23), section 4.2.)

¹⁷⁸ P, p.74

¹⁷⁹ P, p.81-82

¹⁸⁰ P, p.134

Nous devons ici nous rappeler que l'irréversibilité est pour Bohr un concept complémentaire à ceux de la dynamique, et qu'en conséquence elle est à objectivité faible. Pour avoir une expérience, la situation doit donc, être telle que par rapport à l'instrument on puisse négliger le quantum d'action et que les conditions de l'instrument lui permettent d'avoir des processus irréversibles.

Même si l'on accepte le point de vue de Bohr, on peut se demander s'il n'est pas possible d'analyser plus en détail l'irréversibilité inhérente à la mesure. Les questions à étudier sont, par exemple: existe-il un minimum bien défini d'accroissement de l'entropie chaque fois qu'une certaine quantité est mesurée? Ce minimum, est-il indépendant de l'arrangement expérimental utilisé? Ce genre de questions a été abordé par Bohr dans un échange de lettres avec Pauli¹⁸¹. Dans une de ses lettres, Pauli manifeste son intérêt pour l'aspect quantitatif de la connexion entre l'entropie et l'observation. Il se pose des questions semblables à celles que nous nous sommes posées plus haut, décrit son approche du problème et demande à Bohr son opinion. Bohr lui répond que, à son avis, le problème du rapport entre l'irréversibilité et l'observation est purement épistémologique et, par conséquent, de nature qualitative plutôt que quantitative. Il souligne que, dans tout problème d'observation, l'irréversibilité a ses racines dans un certain niveau de complication de l'interaction entre l'objet et les appareils de mesure.

Bohr fait ensuite quelques remarques sur la mesure de la position d'une particule dans le cas où au lieu de la faire parvenir sur une plaque photographique, on la fait entrer dans une boîte à travers une petite ouverture de telle façon que la probabilité pour la particule de s'échapper de la boîte soit négligeable. Malheureusement, les arguments de Bohr ne sont pas très clairs. Cela s'explique peut être par le fait qu'il s'agit d'une lettre dans laquelle tout ce qu'il se propose est de mentionner ses considérations générales au sujet de la relation entre l'irréversibilité et l'observation. Nous ne pouvons donc demander ici le même degré de précision et de non-ambiguïté que dans un essai ou un article scientifique. Ce qui est intéressant pour nous, c'est la conclusion à laquelle Bohr arrive à partir de ses considérations générales.

"(...) dans les circonstances optimales l'accroissement inévitable d'entropie peut être diminué jusqu'à une valeur de l'ordre de K , représentant la limite pour l'utilisation non ambigu du concept même d'entropie. Ici, j'ai à l'esprit des considérations sur la relation complémentaire entre les concepts mécaniques et les concepts thermodynamiques telles que celles que j'ai essayé d'indiquer dans ma "Faraday Lecture". De la même façon que de telles considérations constituent une attitude cohérente en ce qui concerne les paradoxes bien connus de l'irréversibilité de l'observation, il est adéquat de regarder les considérations thermodynamiques d'une part et l'essence du problème observationnel d'autre part comme deux aspects différents et complémentaires de la description."¹⁸²

Ce que Bohr veut indiquer dans la citation précédente est peut-être qu'on peut diminuer, moyennant des arrangements expérimentaux adéquats, l'accroissement inévitable d'entropie associé à la mesure d'une quelconque quantité physique jusqu'à ne plus pouvoir affirmer s'il y a ou non un processus irréversible. L'analyse de l'entropie inhérente à la mesure de la quantité nous amènerait donc au point où nous ne pourrions pas affirmer qu'il

¹⁸¹ Réf. (146)

¹⁸² Réf. (146)

y a irréversibilité et, en conséquence, de mesure.

Les deux situations - celle où l'on mesure une quantité physique et celle où l'on analyse l'irréversibilité inhérente à la mesure- seraient donc mutuellement exclusives. Mais nécessaires l'une et l'autre pour épuiser toute l'information définissable sur le processus de mesure. Elles seraient donc complémentaires.

4.4. LA COMPLEMENTARITE DANS DES DOMAINES DIFFERENTS DE LA PHYSIQUE

La complémentarité est proposée comme une utilisation du langage courant qui permet de parler sans ambiguïté d'expériences dont la description ne peut pas se faire dans le langage courant normal d'une façon exempte d'ambiguïté. Les expériences en question sont les expériences quantiques.

Etant donné que nous avons un nouveau mode de description il est naturel d'explorer la possibilité de l'étendre à des domaines dans lesquels on trouve une similitude épistémologique avec le domaine quantique, c'est-à-dire où il y a des expériences qui ne peuvent pas se décrire sans ambiguïté dans le langage courant normal. Il est, donc, naturel que Bohr tente d'utiliser son nouveau mode de description dans toutes les situations qui présentent un caractère contradictoire ou paradoxal. Si nous possédons un nouvel outil conceptuel il faut l'essayer dans des domaines où l'outil ordinaire ne fonctionne pas.

A ce sujet Bohr remarque que:

"Il ne s'agit pas ici d'analogies plus ou moins vagues mais d'une recherche des conditions d'applicabilité cohérente de notre appareil verbal."¹⁸³

4.4.1. La complémentarité dans la biologie

Quand il applique l'idée de la complémentarité à la biologie, Bohr propose une solution originale au dilemme existant entre les mécanistes - ou réductionnistes - qui veulent réduire tous les phénomènes de la vie aux lois de la physique et les vitalistes - ou finalistes - qui doutent d'une telle possibilité.

Nous n'approfondirons pas les positions réductionnistes et finalistes, ni ne parlerons des nouvelles idées qui peuvent se trouver impliquées à ce sujet dans les travaux de Prigogine sur les structures dissipatives, et nous ne nous engagerons pas non plus dans une discussion concernant la validité des considérations proprement biologiques de Bohr. Tout cela dépasserait l'objectif de cette thèse. Ce qui nous intéresse est de voir si le sens dans lequel Bohr propose d'employer le mode complémentaire de description dans la biologie est le même dans lequel il l'emploie dans la physique quantique. D'une façon plus générale ce que nous voulons analyser est de savoir si l'usage proposé correspond à la définition précise de la complémentarité que nous avons présentée dans la section 4.2.

Bohr fait les observations suivantes:

a) N'importe lequel du dispositif expérimental permettant d'étudier le comportement des atomes qui composent un organisme vivant avec les mêmes méthodes que celles

¹⁸³ P, p. x

employées en physique atomique, exclurait la possibilité de maintenir l'organisme vivant. On tue un animal, par exemple, si on prétend poursuivre l'étude de ses organes jusqu'au point de déterminer le rôle des atomes individuels dans les fonctions vitales. Dans toute expérience avec des êtres vivants subsiste, alors, une incertitude sur les conditions physiques auxquelles ils sont sujets.

"(...) ceci nous conduit à penser que la liberté minimum, que nous sommes ainsi obligés d'accorder aux organismes est juste suffisante pour leur permettre de nous cacher en quelque sorte leurs derniers secrets."¹⁸⁴

b) L'échange incessant de matière inséparablement lié à la vie implique l'impossibilité de considérer l'organisme comme un système bien défini de particules matérielles tel que les systèmes qu'on considère pour rendre compte des propriétés physiques et chimiques de la matière.

c) Nous avons besoin, donc, de concepts qui:

" (. . .) transcendant la portée des sciences (la physique et la chimie) se réfèrent directement à l'intégrité de l'organisme."¹⁸⁵

Parmi ces concepts différents de ceux de la physique, Bohr mentionne la notion de finalité:

"Sans tenter une définition exhaustive de la vie organique nous dirons qu'un organisme vivant est caractérisé par sa permanence et son adaptabilité, ce qui implique qu'une description des fonctions internes d'un organisme, ou de ses réactions à un stimulant, exige l'usage de la notion de finalité, tout à fait étrangère à la physique et à la chimie."¹⁸⁶

d) Cependant, toute expérience en biologie se réalise avec des appareils qui sont soumis aux lois de la physique. Le compte rendu de l'expérience doit alors se faire avec les concepts de la physique. Nous ne pouvons donc pas, nous passer des concepts physiques pour parler d'une expérience en biologie:

" (...) aucun résultat d'une recherche biologique ne peut être décrit sans ambiguïté autrement qu'en termes de physique et de chimie."¹⁸⁷

Sur la base des observations précédentes Bohr propose de considérer comme complémentaires les lois de la nature constituées par les régularités biologiques, et les lois qui gouvernent les propriétés des corps inanimés. C'est-à-dire que les conditions d'observation nécessaires pour étudier les régularités biologiques, comme l'autoconservation et la reproduction des individus, s'excluraient avec les conditions nécessaires pour toute analyse physique; mais les deux types d'observations seraient également nécessaires pour entendre la vie.

" (. . .) ce qui fait le fond de notre analogie, c'est le rapport de complémentarité, d'exclusion mutuelle entre la subdivision nécessaire à toute analyse physique et

¹⁸⁴ P, p. 11

¹⁸⁵ P, p. 115

¹⁸⁶ P, p.139

¹⁸⁷ P, p. 29

certaines phénomènes caractéristiques de la biologie, tels que l'autoconservation et la reproduction des individus."¹⁸⁸

Bohr propose aussi une analogie entre la vie et le quantum d'action:

"De même que le quantum d'action apparaît dans la description des phénomènes atomiques comme un élément pour lequel une explication n'est ni possible ni requise, de même le concept de vie est un concept élémentaire en biologie. Dans cette science, l'existence et le développement même des organismes vivants nous apparaissent comme des manifestations des possibilités de la nature à laquelle nous appartenons et non comme résultats d'expériences que nous pouvons faire nous-mêmes."¹⁸⁹

4.4.2. La complémentarité dans la psychologie

Bohr remarque d'abord que dans une analyse psychologique il est impossible de faire une distinction claire entre les phénomènes mêmes et leur perception consciente, et que cette situation exige clairement que l'on renonce à toute description causale selon le modèle de la physique classique. Dans le chapitre 2 quand nous avons analysé l'unicité du langage courant nous avons appelé ce fait "la difficulté psychologique".

Bohr soutient une relation de complémentarité entre les concepts d'"instinct" et de "raison":

"Nous signalerons d'abord la relation nettement complémentaire qui existe entre les aspects du comportement des êtres vivants que l'on caractérise par les mots d'"instinct" et de "raison"."¹⁹⁰(68)

Nous pouvons organiser le raisonnement de Bohr de cette façon

a) Quand nous employons le mot "raison" nous nous référons à une situation ou expérience où sont impliquées des pensées humaines. Mais aucune pensée humaine:

"(...) n'est imaginable sans un cadre de concepts construit sur un langage que chaque génération doit apprendre de nouveau. Or l'usage des concepts (...) supprime dans une large mesure la vie instinctive (...)"¹⁹¹

b) Quand nous employons le mot "instinct" nous pensons à une situation ou expérience caractérisée par une renonciation à tout recours à la pensée conceptuelle:

"On connaît (...) l'extraordinaire faculté qu'ont les peuples dits primitifs de s'orienter dans les forêts et les déserts, faculté perdue en apparence dans les sociétés plus civilisées, mais qui peut revivre à l'occasion en certains d'entre nous: il semble justifié d'admettre que de telles performances ne sont possibles que par un renoncement à tout recours à la pensée conceptuelle (...)"¹⁹²

c) Les deux mots sont nécessaires pour distinguer les diverses situations où peuvent se

¹⁸⁸ P, p. 13

¹⁸⁹ P, p.115

¹⁹⁰ P, p.40

¹⁹¹ P, p.41

¹⁹² P, p.41

trouver les hommes.

Bohr affirme également qu'il existe une relation de complémentarité entre les mot "pensée" et "sentiment". A ce sujet il présente à peine des arguments et il se limite à faire des observations qu'il semble considérer comme évidentes:

"Nous savons tous, et on l'a dit depuis longtemps, que si nous tentons d'analyser nos propres émotions, nous ne les éprouvons plus guère, et nous reconnaissons qu'il existe entre expériences psychiques dont la description exige des mots tels que 'pensées' et 'Sentiments', une relation de complémentarité semblable à celle que nous trouvons entre expériences atomiques obtenues avec montages différents et décrites par des analogies tirées de nos représentations habituelles."¹⁹³

Il est possible de comprendre le sens de la citation précédente en analysant deux expériences psychologiques et les mots qui peuvent s'employer pour les décrire:

Expérience A :

Nous sommes saisis par un sentiment de volition. La situation psychologique dans laquelle nous nous trouvons à ce moment, le contenu de conscience qui est le nôtre, nous pouvons les décrire avec le mot "volition" ou avec des mots en rapport avec ce dernier comme par exemple "Je veux telle chose", mais nous ne pouvons pas dire sur l'expérience en question: "Je pense pourquoi je veux telle chose".

Expérience B:

Nous analysons notre sentiment de volition. Au moins pendant la durée de l'analyse l'émotion n'est guère ressentie. Il est possible de décrire la situation psychologique en disant: "J'étudie pourquoi je veux telle chose", mais nous ne la décrivons pas vraiment si nous disons "Je veux telle chose".

4.4.3. La complémentarité dans l'éthique, la linguistique et la sociologie.

Bohr tente d'employer la complémentarité dans les champs de l'éthique, la linguistique et la sociologie. Une analyse de ses propositions pour étendre le mode complémentaire de description aux domaines mentionnés montre, cependant, que Bohr a voulu aller trop loin et a même commis des glissement de sens.

Dans *l'éthique* il soutient qu'il y aurait une relation de complémentarité entre la justice et la charité:

"(...) bien que la combinaison la plus intime possible entre la justice et la charité soit un but commun à toutes les cultures, il faut reconnaître que tout ce qui exige la stricte application de la loi empêche la charité de se manifester. Inversement, la bienveillance et la compassion peuvent entrer en conflit avec l'idée de justice."¹⁹⁴

Le problème entre la justice et la charité est, néanmoins trop complexe pour pouvoir affirmer qu'effectivement une situation qui peut se décrire par le mot justice est par nécessité

¹⁹³ P, p.39

¹⁹⁴ P, p.123

mutuellement exclusive avec une autre situation qui peut être décrite par le mot charité. D'une part l'application stricte de la justice n'est pas une question uniquement de lire les textes où est rédigée la loi; l'affaire est beaucoup plus complexe que cela et il se peut bien que l'on ait besoin des sentiments comme ceux d'amour ou de charité pour appliquer la justice. D'autre part il n'est pas évident de dire quelles sont les situations où la charité peut se manifester; il existe une conception éthique qui soutient que la charité doit se manifester dans toutes les circonstances même dans celles qui impliquent l'application de la justice. La charité est quelque chose d'éminemment personnel et elle est rattachée à des sentiments profonds non seulement d'amour mais aussi d'une justice plus compréhensive que celle définie dans les textes de la loi.

Sur la linguistique Bohr dit:

"(...) il existe toujours une relation d'exclusion mutuelle entre l'usage pratique d'un mot, quel qu'il soit, et l'essai de sa définition précise."¹⁹⁵

Il y a deux critiques que l'on peut faire à Bohr au sujet de l'emploi précédent de la complémentarité dans la linguistique:

a) Il est nécessaire de présenter des arguments pour montrer que, en effet, une expérience où l'on fait un usage pratique d'un mot est mutuellement exclusive avec une autre expérience où l'on essaie de définir avec précision le mot en question. Il n'est pas évident que l'on ne puisse pas faire un usage pratique d'un mot et tenter en même temps de trouver sa définition stricte, ou essayer de le définir avec précision en faisant de lui un usage pratique.

b) Même si l'on arrive à présenter des arguments pour montrer que les deux expériences en question sont mutuellement exclusives il faudrait identifier les concepts rattachés à chaque expérience et qui seraient, en conséquence, des concepts complémentaires.

Dans le champ de la *sociologie* Bohr veut appliquer la complémentarité à l'étude et à la comparaison des cultures humaines. Dans ce cas, cependant, ses tentatives ne sont en rien convaincantes. Quand il considère les différentes cultures il soutient que:

"Le fait que des cultures humaines, développées dans des conditions de vie différentes, présentent dans leur traditions et leur structures sociales de si grands contrastes, nous permet de les dire en un certain sens complémentaires."¹⁹⁶

Néanmoins, lui même reconnaît que la situation n'est pas comparable ici à celle de la physique, de la biologie et de la psychologie puisqu'il s'agit de différentes attitudes qui peuvent être appréciées ou améliorées par des rapports plus étroits entre les peuples. En plus, il y a le fait, mentionné par Bohr lui même de ce que souvent il a eu des fusions de cultures conservant les éléments de valeur des cultures nationales.

4.5. PEUT-ON AFFIRMER QUE LA MECANIQUE QUANTIQUE CONTIENT LA MECANIQUE CLASSIQUE?

Tout d'abord il est nécessaire d'examiner ce que l'on veut dire lorsque l'on affirme qu'une théorie contient une autre. Etudions brièvement le cas de la relativité restreinte et la

¹⁹⁵ P, p.77

¹⁹⁶ P, p.141

mécanique classique:

i. Les concepts mathématiques et les équations de la théorie de la relativité restreinte peuvent être considérées comme une généralisation de ceux de la mécanique classique.

ii. Les prédictions de la relativité restreinte coïncident avec celles de la mécanique classique dans la limite des vitesses très petites par rapport à la vitesse de la lumière.

Normalement les deux faits précédents sont considérés comme suffisants pour soutenir que, effectivement la mécanique classique est contenue dans la relativité restreinte.

Nous ajouterons une troisième condition implicite que maintenant nous devons expliciter:

iii. Les deux théories emploient le langage courant dans le même mode de description (le mode normal).

Examinons maintenant la relation entre la mécanique quantique et la mécanique classique.

i. Les concepts mathématiques et les équations de la mécanique quantique peuvent être considérés comme une généralisation de ceux de la mécanique classique. Il existe une analogie formelle entre les deux théories, ainsi que le montre Dirac.¹⁹⁷

ii. Les prédictions de la mécanique quantique coïncident avec celles de la mécanique classique dans la limite des actions très grandes par rapport au quantum d'action.

Les deux faits ci-dessus constituent le principe de correspondance.

Quant au troisième point il est clair que, selon l'interprétation de Bohr, les deux théories ne coïncident pas en ce qui concerne l'usage du langage courant. La quantique utilise le mode complémentaire de description et la classique le mode normal. Contrairement à l'affirmation de Landau¹⁹⁸, nous pouvons dire, en conséquence que, pour Bohr, la théorie quantique ne contient pas la théorie classique ou, au moins, ne la contient pas de la même manière que la relativité restreinte le fait.

Nous devons souligner que, pour Bohr, la quantique et la classique ont besoin, toutes les deux, des concepts classiques pour être formulées et pour être vérifiées, mais qu'elles diffèrent sur la façon d'employer ces concepts.

Nous ne pouvons pas dire, si nous admettons l'interprétation de Bohr, que la mécanique quantique a besoin de la mécanique classique, mais plutôt que les deux ont besoin du langage courant.

Les considérations antérieures sont suffisantes pour affirmer que la complémentarité répond à certaines objections de circularité qui ont été faites à la mécanique quantique et que l'on peut résumer de cette manière:

a) La mécanique classique est un cas particulier de la mécanique quantique.

b) La mécanique quantique a besoin de ce cas particulier pour sa formulation et sa

¹⁹⁷ Dirac, P; **Quantum Mechanics** (Oxford University Press, Oxford 1958) Fourth Edition

¹⁹⁸ Landau, L; Lifshitz, E.M.; **Mecánica Cuántica No-Relativista** (Editorial Reverté, S.A., Barcelona, 1972)

vérification.

4.6. COMMENTAIRES FINALS

Pour comprendre l'essence de la complémentarité et la manière dont elle lève les paradoxes quantiques il faut réaliser que l'approche de Bohr est purement épistémologique.

Voyons de nouveau très brièvement la solution de Bohr au paradoxe quantique, lequel consiste en ce que les régularités quantiques ne peuvent pas s'expliquer au moyen du langage courant; ce dernier cependant est le seul langage qui permette d'arriver à la non-ambiguïté.

La solution de Bohr

i. Nous ne devons nous :

"Servir du mot phénomène que pour rapporter des observations obtenues dans des conditions parfaitement définies, dont la description implique celle de tout le dispositif expérimental."¹⁹⁹(77)

ii. Dans un phénomène quantique nous devons faire une distinction fondamentale entre:

– l'instrument décrit avec le langage courant dans son mode normal de description, et

– l'"intérieur" du phénomène qui est décrit dans le mode complémentaire de description.

iii. L'"intérieur" du phénomène se manifeste par des effets irréversibles d'amplification dans l'instrument. L'évidence ainsi obtenue doit se décrire par le mode complémentaire de description.

Il est évident qu'il s'agit d'une stratégie uniquement épistémologique. Dans la mesure où l'on accepte la thèse implicite de Bohr selon laquelle une ontologie n'est pas nécessaire dans un phénomène quantique, thèse que nous discuterons dans le chapitre 6, la complémentarité de Bohr est valable comme solution aux paradoxes quantiques.

¹⁹⁹ P. p.110

CHAPITRE 5

L'INDIVISIBILITE

Nous étudierons maintenant ce qui constitue peut-être l'intuition la plus significative de Bohr. Il s'agit de l'"indivisibilité" entre les instruments et les objets quantiques. L'importance de cette idée vient du fait que même si l'on rejette les à priori philosophiques de Bohr, tels que sa thèse sur le langage courant ou son refus de l'ontologie - duquel nous parlerons au chapitre 6 - , même si l'on considère que son interprétation est déjà dépassée, même si on la dit incompréhensible, ou floue - et c'est notre avis que si elle n'est pas incompréhensible, elle n'en est pas moins obscure - même si par opposition, on adhère au réalisme, voire au réalisme physique, il reste que, par son idée d'indivisibilité, Bohr a apporté quelque chose qui s'est avéré être très proche de la vérité, puisque la non-séparabilité est maintenant établie.

Pour notre analyse, il est nécessaire que nous étudions le concept de non-séparabilité. Ce concept se formule d'une façon précise au moyen du principe de séparabilité que nous présenterons dans les sections qui vont suivre.

5.1 INDIVISIBILITE ET NON-SEPARABILITE

5.1.1 Réalisme et réalisme physique

Le *réalisme* est une position philosophique selon laquelle il existe "quelque chose" en dehors de nous qui est indépendant de ce que nous connaissons et de ce que nous décidons de mesurer, mais qui influence cependant les résultats de nos mesures. C'est ce "quelque chose" que nous appelons la "réalité indépendante" (sous-entendue: indépendante de l'être humain).

Etant donné que l'hypothèse réaliste est très générale, il y a plusieurs variétés de réalisme, mais en ce qui concerne la science, nous sommes intéressés par ce que nous pouvons appeler le *réalisme physique*²⁰⁰ selon lequel il existe une réalité physique indépendante qui se trouve, pour ainsi dire, "derrière" les phénomènes et qui les "soutient", réalité qui est composée de parties - que l'on appelle systèmes physiques - qui peuvent interagir tout en étant cependant distinctes. Il est postulé aussi que *l'état objectif* - objectif dans le sens fort, bien entendu - de ces systèmes physiques est spécifié par un ensemble de paramètres représentables par des nombres réels.

La physique classique est totalement compatible avec le réalisme physique. En effet, en physique classique, on considère qu'il existe certaines quantités physiques, telles que les positions et les vitesses des particules ou les intensités des champs électromagnétiques, qui constituent les éléments d'une série de paramètres spécifiant l'état des différents systèmes. Ces paramètres peuvent être considérés comme étant indépendants de notre connaissance.

²⁰⁰ d'Espagnat, B.: **Une incertaine réalité** (Gauthiers-Villars, Paris 1.985)

5.1.2 La séparabilité

La conception précédente englobe implicitement une certaine idée-très général- de séparation, laquelle est nécessaire pour incorporer la notion général d'objet. En effet, on considère que ce qui se passe dans un système physique ne dépend pas ou ne dépend que très faiblement de ce qui se passe dans d'autres systèmes physiques suffisamment éloignés du système en question - spatialement et/ ou temporellement. Plus précisément, les entités qui composent la réalité physique sont localisables dans des régions distinctes et n'ont les unes sur les autres que des influences décroissant avec la distance. C'est cette indépendance de certains systèmes par rapport à d'autres qui permet notamment aux scientifiques d'étudier le comportement des objets sur la Terre, sans avoir en général à tenir compte de ce qui se passe, par exemple, dans d'autres galaxies.

Cette idée générale de séparation, nous pouvons l'appeler séparabilité "au sens large"²⁰¹. Mais il faut encore la préciser, car même si deux systèmes physiques sont très éloignés l'un de l'autre, ils peuvent malgré tout exercer une certaine influence l'un sur l'autre. C'est le cas d'une sonde spatiale qui se trouve à des centaines de millions de kilomètres de la Terre mais que des instruments sur celle-ci permettent néanmoins de contrôler de façon précise.

Nous pouvons également trouver des corrélations entre systèmes physiques très éloignés l'un de l'autre. Considérons, par exemple, deux sondes spatiales, l'une sur la Lune et l'autre sur Mars. Si les sondes sont contrôlées par un même dispositif terrestre, il peut y avoir une corrélation dans leur comportement. En effet, supposons pour les deux sondes un comportement simple, tel que le mouvement vers la gauche ou vers la droite, ces mouvements étant contrôlés par le dispositif depuis la Terre, lequel contrôle les ondes au moyen de paires de signaux: il envoie un signal à l'une des sondes et l'autre signal à l'autre sonde. Entre paires de signaux, il existe un certain délai. Supposons de plus que lorsque le dispositif ordonne à l'une des sondes de se mouvoir vers la gauche, il ordonne à l'autre sonde, après un certain délai, de se mouvoir vers la droite et inversement.

Le dispositif donne toujours ses instructions dans le même ordre, c'est-à-dire que c'est toujours la même sonde qui est choisie pour l'envoi du premier signal. Nous supposons également que le délai entre les signaux qui vont à chaque sonde est le même. En revanche, nous supposons que le délai entre paires de signaux de même que le sens du mouvement de la première sonde - vers la droite ou vers la gauche - sont choisis au hasard.

Imaginons un observateur sur la Lune qui y suit le comportement de la sonde. A partir de ses observations, il peut trouver la probabilité pour la sonde de se mouvoir vers la droite ou vers la gauche, et il peut donc faire des prédictions statistiques sur le comportement de la sonde. Supposons maintenant que l'observateur connaît aussi le comportement de la sonde sur Mars. Dans ce cas, il va trouver que chaque fois que la sonde sur la Lune se meut vers la gauche, celle qui se trouve sur Mars le fait vers la droite, et inversement. Il trouve par conséquent que cette corrélation lui permet de décrire avec certitude le mouvement d'une des sondes à partir d'une connaissance du comportement de l'autre.

Doit-il conclure pour autant à une influence d'une sonde sur le comportement de l'autre? Si la distance temporelle entre les deux événements en question - c'est-à-dire le mouvement de la sonde lunaire vers la droite ou vers la gauche et le mouvement de la sonde martienne vers

²⁰¹ Réf. (200)

la droite ou vers la gauche –est telle qu'un signal de lumière peut voyager entre la Lune et Mars pendant cette distance temporelle, l'observateur peut admettre comme hypothèse valable l'existence d'une influence d'un des événements sur l'autre.²⁰² Par contre, si pendant l'intervalle de temps qui sépare les deux événements, un signal de lumière ne peut voyager entre la Lune et Mars, l'observateur cherchera un autre événement, antérieur aux deux événements en question qui puisse être la cause de la corrélation.²⁰³ Dans notre exemple, l'événement commun est l'émission par le dispositif terrestre d'une paire des signaux ordonnant aux deux sondes la façon dont elles doivent se mouvoir.

De la discussion précédente, il s'en suit que pour préciser l'idée de séparabilité, il faut prendre en compte:

- a) que toute influence possible entre deux systèmes éloignés l'un de l'autre va se faire de plus en plus petite à mesure que croît la distance entre les deux systèmes, et
- b) que si deux événements - chacun dans un de ces deux systèmes - sont tels qu'un signal de lumière ne peut pas voyager d'un système à l'autre pendant l'intervalle temporel qui les sépare, toute corrélation éventuelle entre eux doit être considérée comme produite par un événement antérieur qui a lieu dans un autre système.

Avant d'énoncer un "principe de séparabilité" fondé sur les idées précédentes, qui sont associées d'une façon naturelle à celle de séparation physique, nous devons faire une remarque importante.

Supposons que dans le cas des sondes spatiales que nous avons considéré auparavant l'observateur sur la Lune trouve que le mouvement de la sonde martienne - qu'il sait être en corrélation avec celui de la sonde lunaire - a lieu quelques instants avant le mouvement de la sonde sur la Lune. La probabilité qu'il assignera au prochain mouvement de la sonde lunaire sera zéro ou un, suivant le mouvement qu'il a observé quelques instants auparavant pour la sonde martienne. D'autre part, un deuxième observateur sur la Lune ignorant du mouvement de la sonde martienne, va assigner une probabilité comprise entre zéro et un pour chacun des deux mouvements possibles de la sonde lunaire. En général, si deux sondes spatiales différentes réagissent en corrélation, la probabilité pour qu'une sonde fasse telle ou telle manœuvre à tel moment, sera différente pour un observateur ignorant la manœuvre effectuée quelques instants auparavant par l'autre sonde, de celle d'un autre observateur qui connaît la manœuvre de cette dernière sonde. Cela n'a rien de surprenant, étant même d'une nature évidente.

²⁰² L'événement que l'observateur va considérer comme celui qui influence l'autre dépendra, bien entendu, de l'ordre temporel qu'il trouve entre les événements et cet ordre sera une fonction de l'ordre dans lequel le dispositif terrestre envoie ses signaux, de l'intervalle de temps parmi eux, et de la position relative de la Lune, de Mars et de la Terre pendant le temps que l'observateur met pour faire ses observations.

²⁰³ Il faut préciser que même dans le premier cas considéré, c'est-à-dire quand l'hypothèse d'une influence d'un des événements sur l'autre est valable, l'observateur peut aussi, d'un point de vue logique, considérer comme également valable l'hypothèse d'un événement antérieur aux deux événements en question qui serait la cause de la corrélation.

Nous devons remarquer, néanmoins, que la raison pour laquelle nous considérons comme évident que les probabilités assignées par les deux observateurs en question sont différentes, est que nous supposons que les observateurs ne sont pas au courant des détails de la manipulation du dispositif terrestre qui contrôle le mouvement des sondes. Dans notre cas, ils ne connaissent même pas l'existence d'un tel dispositif. Si nous supposons, par contre, que les observateurs connaissent l'existence du mécanisme terrestre et les détails de sa manipulation, nous considérerons qu'ils vont calculer les probabilités en question sur la base de cette unique information. En d'autres termes, pour un observateur sur la Lune qui est bien informé de la situation concernant le dispositif terrestre, les informations supplémentaires relatives au comportement de la sonde martienne n'auront pas d'influence sur son estimation de la probabilité des mouvements de la sonde lunaire.

5.1.3. Le principe de séparabilité

Il a été dit que l'idée générale de séparation physique peut être précisée au moyen d'un "principe de séparabilité". Nous énoncerons ce principe dans le cadre d'un exemple présenté par d'Espagnat.²⁰⁴

Supposons une source S localisée dans une région définie de l'espace et une particule U émise par cette source. Soient A une certaine grandeur physique que l'on mesure sur la particule U , F un instrument adapté à la mesure de A sur U dans une région spatio-temporelle R , \vec{a} un paramètre variable appartenant à F , et α le résultat de la mesure de A . Supposons de plus une autre particule V qui est émise également par la source S au même instant que la particule U . Soient B une certaine grandeur physique que l'on mesure sur la particule V , G un instrument adapté à la mesure de B sur V dans une région spatio-temporelle R' , \vec{b} un paramètre variable appartenant à G et β le résultat de la mesure de B . Nous nous plaçons dans le cas où la nature de chacune des grandeurs physiques A et B , effectivement mesurée par l'appareil correspondant, dépend des paramètres \vec{a} et \vec{b} , respectivement. Supposons finalement que λ représente une série de paramètres qui spécifient complètement l'état objectif de la source S au moment de l'émission des particules U et V .

Considérons à présent la probabilité p pour que F fournisse le résultat α quand \vec{a} et l'état objectif de la source S sont complètement fixés. Nous parlons de probabilité, puisque indépendamment du fait de postuler ou non le déterminisme strict, les résultats des mesures ne peuvent pas, en général, être prédits avec certitude à cause de l'insuffisance de la connaissance des états objectifs préexistants des divers systèmes en jeu. On définit les probabilités comme des limites de fréquence d'occurrence sur des ensembles statistiques dont le nombre est très grand.

Pour l'essentiel, le principe de séparabilité est contenu dans les deux affirmations suivantes:

- a) La valeur de p ne dépend pas ou ne dépend que très faiblement, de la valeur du paramètre \vec{b} que l'expérimentateur qui manipule l'instrument G peut choisir de donner à celui-ci et du résultat de la mesure alors fourni par G . Compte tenu de la discussion de la section précédente, il est facile de voir que la condition a) est une condition naturelle.

²⁰⁴ Réf.(200)

- b) La distribution de probabilités relative à l'état objectif de la source est indépendante des valeurs des paramètres \vec{a} et \vec{b} . Si nous reprenons notre exemple des sondes lunaire et martienne, l'affirmation b) signifie simplement que le détail de la manipulation du dispositif terrestre qui contrôle les sondes ne dépend en rien des orientations \vec{a} et \vec{b} des récepteurs situés chacun dans une des sondes. On voit sans difficulté que la condition en question est tout aussi naturelle.

Nous appellerons *conception séparable*²⁰⁵ une conception réaliste dans laquelle le principe de séparabilité est considéré comme valable. La physique classique est compatible avec la conception séparable étant donné que:

- i) Les états des systèmes sont définis en termes de quantités physiques qui sont considérées comme existant indépendamment du fait qu'on les observe ou non.
- ii) Les systèmes physiques classiques sont assignés à une certaine région limitée de l'espace-temps.
- iii) Les interactions classiques diminuent avec la distance et aucune influence physique ne peut se transmettre plus rapidement que la lumière.

Il faut souligner que le principe de séparabilité correspond à l'idée de séparation du langage courant. On peut considérer qu'il constitue un raffinement de cette idée.

5.1.4. Le principe de séparabilité et l'interprétation de Bohr de la mécanique quantique. L'indivisibilité de Bohr.

De ce que nous connaissons déjà de la pensée de Bohr, il n'est pas difficile de voir que pour lui le principe de séparabilité n'a pas de sens dans un phénomène quantique.

En effet:

Premièrement: Nous ne pouvons pas parler sans ambiguïté de l'état objectif d'un système quantique. Il est nécessaire de spécifier tout le dispositif de mesure si nous voulons nous référer à quelque chose comme -l'"état" de la source, y compris l'appareil avec lequel nous accédons à la connaissance de cette source.

Deuxièmement: Dans la situation particulière que nous venons de discuter, le phénomène quantique total comprendra la source, les particules U et V, les instruments F et G, et l'instrument avec lequel on détermine l'"état" de la source S. Tout ce phénomène constitue une totalité strictement indivisible. Nous ne pouvons pas considérer les instruments et les particules comme étant "séparés". Et cela, quelle que soit la distance entre les instruments F et G. Nous ne pouvons pas parler sans ambiguïté des deux particules de la même façon que l'on parle de deux objets classiques car les particules appartiennent à l'"intérieur" du phénomène total.

²⁰⁵ d'Espagnat, B.; "Non-separability and the Tentative Description of Reality". **Phys. Rep.** Vol.110. No. 4 1.984 p.203 -264

Il est possible d'affirmer, par conséquent, que pour Bohr il ne s'agit pas d'une non-séparabilité au sens du principe de séparabilité, - c'est-à-dire telle que l'on ne puisse pas considérer que les effets éventuels produits sur la particule U par des mesures faites sur la particule V peuvent toujours être rendus aussi petits que l'on veut en choisissant convenablement la distance entre les deux particules -, mais plutôt d'une *indivisibilité* qui ne permet pas de concevoir le phénomène comme étant composé de parties séparées: nous ne pouvons pas parler des instruments et des particules séparés, ni de particules séparées, l'une produisant des effets sur l'autre. Parler d'une particule affectée par les mesures faites sur l'autre particule est, selon Bohr une manière totalement inadéquate de s'exprimer.

Le principe de séparabilité aussi bien que les considérations sur celui-ci que l'on peut dégager de la pensée de Bohr existaient d'une manière implicite dans le débat entre Einstein et Bohr sur la complétude de la mécanique quantique. Nous analyserons ce débat dans le prochain chapitre. Voyons maintenant la non-séparabilité ou violation du principe de séparabilité.

5.1.5. La non-séparabilité

Il est possible de prouver que le principe de séparabilité entraîne, entre quantités mesurables, l'existence de certaines inégalités dites de Clauser, Horne, Shimony et Holt lesquels constituent une généralisation des inégalités dites de Bell.

Les règles de calcul de la Mécanique quantique prévoient au contraire la violation, dans certains cas, de ces inégalités. Ce fait donne la possibilité de tester expérimentalement le principe de séparabilité. Compte tenu des résultats des expériences effectuées jusqu'à présent²⁰⁶, la communauté internationale des physiciens est quasi-unanime à affirmer que la violation des inégalités mentionnées, et en conséquence du principe de séparabilité, est chose acquise.

Pour terminer cette section, deux remarques s'imposent:

- 1) La séparabilité reste valable dans tous les phénomènes macroscopiques.
- 2) La non-séparabilité n'a rien à voir avec le déterminisme. En effet, dans la formulation du principe de séparabilité, nous n'avons pas postulé le déterminisme.

5.1.6. Commentaires

Nous ferons maintenant quelques commentaires sur les notions d'indivisibilité et de non-séparabilité. Notre intention n'est pas d'opposer les deux notions qui sont basées sur des *a priori* philosophiques trop différents. En effet, la non-séparabilité n'a de sens que dans le contexte d'une conception réaliste tandis que l'indivisibilité est un aspect de la thèse de

²⁰⁶ Voir par exemple Aspect, A.; Dalibard, J; et Roger, G; "Expérimental Test of Bell Inequalities using times-varying Analyzers" **Phys. Rev. Lett**, Vol 49, No25 1.982 p.1804 -1807

Bohr, lequel soutient que des considérations ontologiques n'ont pas de place dans l'analyse d'un phénomène quantique (voir Chap. 6). Nous voulons seulement montrer la direction qu'indiquent les notions en question afin de mieux apprécier dans quel sens l'indivisibilité de Bohr s'est avérée être très proche de la vérité.

Les deux notions affirment que dans un phénomène quantique les résultats d'une mesure effectuée par un instrument sur un système donné ne peuvent pas en général être déterminés uniquement par les paramètres rattachés au système et ceux fixant la nature de la quantité mesurée. D'autres variables entrent en jeu, qui dépendent de l'ensemble du dispositif expérimental, lequel peut être arbitrairement étendu.

Selon l'indivisibilité du phénomène quantique nous ne pouvons *diviser conceptuellement* ni les systèmes entre eux ni les systèmes et les instruments de mesure. Selon Bohr, dire que deux systèmes ont interagi en un temps donné et s'éloignent après l'un de l'autre et se demander s'il existera une interaction entre eux quand ils seront séparés par un intervalle spatio-temporel du genre espace, est une manière ambiguë de parler qui strictement n'a pas de sens.

Dans le cas de la non-séparabilité, nous avons affaire aussi à une sorte d'indivisibilité conceptuelle. En effet, dans une version quantitative²⁰⁷ (8), le principe de séparabilité est formulé au moyen des inégalités entre la probabilité $p(\alpha; \lambda, \vec{a})$ pour que F fournisse le résultat α quand \vec{a} et l'état objectif de la source S sont complètement fixés, la probabilité $p(\alpha; \lambda, \vec{a}, \vec{b})$ pour que F fournisse le résultat α quand \vec{a}, \vec{b} et l'état objectif de la source S sont complètement fixés, et la probabilité $p(\alpha; \lambda, \vec{a}, \vec{b}, \beta)$ pour que F fournisse le même résultat α quand \vec{a}, \vec{b} , l'état objectif de la source S et le résultat β fournit par G sont complètement fixés. Plus précisément, l'affirmation a) du principe de séparabilité se formule en spécifiant que les distances entre F, G, et S peuvent être choisies suffisamment grandes pour que

$$\begin{aligned} |p(\alpha; \lambda, \vec{a}, \vec{b}, \beta)p(\alpha; \lambda, \vec{a}, \vec{b})^{-1} - 1| &< 10^{-3} \\ |p(\alpha; \lambda, \vec{a}, \vec{b})p(\alpha; \lambda, \vec{a})^{-1} - 1| &< 10^{-3} \end{aligned}$$

La valeur 10^{-3} est dans une certaine manière arbitraire, nous pouvons choisir une autre valeur suffisamment petite par rapport à 1.

Si nous considérons la formulation quantitative du principe de séparabilité, nous voyons donc que tout ce qui compte, ce sont les formules et là il n'est question que des λ (communs aux deux systèmes) et des résultats de mesure. En conséquence, c'est seulement par commodité du langage qu'on parle des systèmes U et V.

L'indivisibilité est une notion qui dépend de l'existence du quantum d'action, la non-séparabilité en revanche n'a rien à voir avec h . En effet, même si la mécanique quantique devient un jour un cas particulier d'une théorie plus générale au moyen de laquelle on peut expliquer h , les résultats expérimentaux qui montrent la violation de la séparabilité subsisteront.

Nous devons aussi remarquer que la mécanique quantique ne joue aucun rôle dans

²⁰⁷ Réf. (205)

l'élaboration des inégalités de Bell; elle est utilisée seulement pour créer des situations expérimentales où elle prévoit une violation des inégalités de Bell.

Finalement, nous devons dire que l'indivisibilité et la non-séparabilité montrent toutes deux un aspect de *totalité* dans laquelle il existe une connexion de type organique entre les parties de cette totalité. Aucune des deux notions ne possède un analogue classique et les deux heurtent le sens commun; l'indivisibilité, néanmoins, est plus éloignée des concepts du sens commun que ne l'est la non-séparabilité elle-même.

5.2. LA PROBLEMATIQUE DE L'ADEPTE DU REALISME PHYSIQUE ET SA RESSEMBLANCE AVEC LA PROBLEMATIQUE DE NIELS BOHR.

Avant de décrire les problèmes auxquels se heurte le partisan du réalisme physique en raison de l'existence de la non-séparabilité nous devons apporter quelques précisions sur le rapport qui existe entre la violation du principe de séparabilité et la causalité relativiste.

Rappelons tout d'abord, que la causalité relativiste peut être interprétée selon deux points de vue différents:

- a) D'un point de vue pragmatique, le mot signal désigne une entité qui peut servir à des êtres humains à échanger des informations. La causalité relativiste doit être comprise dans le sens qu'aucun signal utilisable ne peut se propager plus vite que la lumière. Dans cette interprétation, on attribue à la causalité relativiste une objectivité faible.
- b) D'un point de vue, réaliste - qui fut celui d'Einstein - la notion de signal doit être conçue comme se référant à la réalité indépendante. Le mot signal désigne toute influence physique, sans aucune restriction sur la possibilité de l'utiliser ou non. La causalité relativiste doit s'énoncer en disant qu'aucune influence physique ne peut se propager plus vite que la lumière.

Remarquons finalement que l'espace-temps et la causalité relativistes peuvent être considérés comme un raffinement des idées ordinaires d'espace, de temps et de causalité physique.

Si nous interprétons la causalité relativiste d'une façon pragmatique, nous pouvons affirmer que la violation du principe de séparabilité n'est pas en conflit avec la relativité. En effet, il peut être prouvé²⁰⁸ que, pour autant que *nous acceptions que les prédictions vérifiables de la mécanique quantique sont justes*, la non-séparabilité ne permet pas la transmission de signaux utilisables.

Cet état de choses est appelé par Shimony: "Une coexistence pacifique" entre la mécanique quantique et la relativité.²⁰⁹

Nous devons remarquer, néanmoins, que si l'on argumente qu'il n'est pas nécessaire que les prédictions de la mécanique quantique soient toujours justes, on peut soutenir qu'il est concevable qu'en fin de compte une "télégraphie supralumineuse" soit possible et

²⁰⁸ Réf(205)

²⁰⁹ Shimony, A.: "Physical and Philosophical Issues in the Bohr- Einstein Debate" dans Feshbach, H.; Matsui, T.; Oleson, A.; **Ed.Niels Bohr: Physics and the World** (Harwood Académie Publishers, 1988)

que la violation du principe de séparabilité est une indication dans ce sens.

Dans le reste de notre analyse, nous accepterons, avec la grande majorité des physiciens, que la violation du principe de séparabilité n'a rien à voir avec une éventuelle "télégraphie supralumineuse". Cette acceptation n'écarte pas les problèmes auxquels se heurte l'adepte du réalisme physique puisque pour lui la causalité relativiste interdit la propagation de toute influence physique à vitesse supérieure à c (vitesse de la lumière) et pas seulement la propagation de signaux supralumineux.

Revenons maintenant à la problématique du partisan du réalisme physique.

D'une manière très générale nous pouvons dire que deux grandes possibilités s'ouvrent au réaliste: l'acceptation ou le refus d'influences supralumineuses.

I) *Acceptations des influences supralumineuses*

Avec cette acceptation, le réaliste se heurte aux problèmes suivants:

- i) Quelle est la nature de ces influences? Sont-elles une extension de l'idée ordinaire de cause? Si nous cherchons à définir ces influences en les considérant comme un raffinement du concept de cause, nous devons accepter qu'elles n'obéissent pas à l'ordre de succession temporelle implicite dans l'idée ordinaire de cause. En effet, rappelons- nous que si deux événements sont séparés par un intervalle du genre espace, il y aura toujours une distance spatiale entre eux - ce qui explique l'expression "du genre espace" donnée à l'intervalle en question. Quant à la séparation temporelle entre eux, elle peut être positive, négative ou nulle, selon le système de référence adopté. En d'autres termes, un des événements peut être le premier dans le temps dans un système de référence, et le second dans le temps dans un autre système et il peut aussi arriver que les deux événements soient simultanés dans un troisième système de référence. Comment peut- on arriver à une extension raisonnable de l'idée de cause si un événement peut à la fois influencer et être influencé par un autre événement et cela selon le système de référence adopté? La seule solution rationnelle semble être de considérer simplement de telles influences comme étant d'une nature totalement différente de ce que nous trouvons dans la vie ordinaire et dans la physique classique.
- ii) Comment expliquer que la violation du principe de séparabilité soit précisément celle que prédit la mécanique quantique?

Il y a ici, au moins trois voies possibles dans la recherche de réponses aux questions précédentes:

- a) Il existe un *éther* ou système de Lorentz R fondamental ou privilégié. Les autres systèmes de référence R paraissent équivalents à R puisque les lois régissant les phénomènes sont invariantes sous le groupe de Lorentz.

La causalité physique n'est valable qu'en R . Tant que la cause précède l'effet en R , les influences causales peuvent bien se propager à une vitesse plus grande que c . Si dans R , un événement P est la cause d'un autre événement P' séparé de lui par un intervalle du genre espace, il y aura d'autres systèmes R dans lesquels P'

apparaîtra comme antérieure à sa cause P. Cela s'interprète en disant que c'est seulement dans le système R que le temps est le temps physique "réel". Dans d'autres systèmes, le temps n'est qu'une apparence.²¹⁰

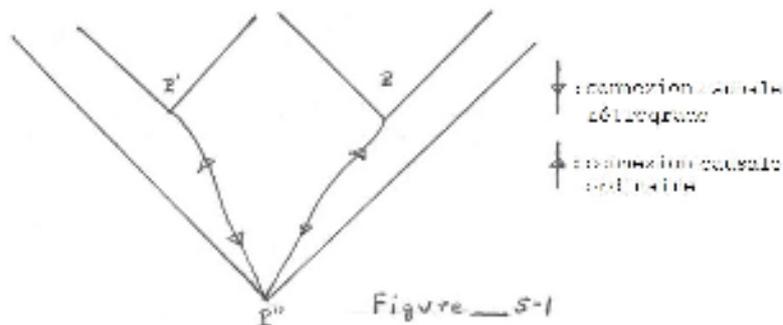
En plus des problèmes généraux communs aux théories qui acceptent l'existence des influences supralumineuses, l'hypothèse d'un éther R se heurte au problème spécifique posé par l'impossibilité d'observer le système de référence privilégié.

b) Il existe un milieu sous-quantique dans lequel la relativité et la mécanique quantique ne sont pas valables. Les deux théories ne sont alors que des approximations.²¹¹

c) Pour expliquer les influences entre des événements séparés spatialement nous devons accepter l'existence de la "causalité rétrograde".²¹²

La "causalité rétrograde" est une sorte de relation causale qui remonterait le temps. Ce type de causalité permettrait de connecter causalement deux événements P et P' séparés spatialement.

Considérons par exemple, un événement P'' dans le passé de P et P' :



P et P' sont séparés par un intervalle du genre espace.

P'' est dans le passé de P et de P', et par conséquent P et P' sont séparés de P'' par un intervalle de genre temps.

Au moyen d'une connexion causale rétrograde les événements P et P' pourraient être liés causalement. En effet, si une telle connexion rétrograde était possible, P et P'' pourraient être liés causalement par une connexion causale rétrograde; étant donné que P'' et P' peuvent être en relation à travers une connexion causale ordinaire, le résultat final serait une connexion causale entre P et P'. De manière totalement symétrique, la connexion causale entre P et P' pourrait être obtenue au moyen d'une connexion causale rétrograde entre P' et P'' et une connexion causale ordinaire entre P'' et P.

²¹⁰ Eberhard, P.H.; "Bell's Theorem and the Different concepts of Locality" **II Nuovo Cimento** Vol.46 B, No. 2 11 Agosto 1.978 p. 392 - 419

²¹¹ Réf. (210)

²¹² Costa de Beauregard, O.; **Proc. of Int. Symp. Foundation of Quantum Mechanics**. Tokio 1.983

Cette sorte de théorie se heurte à des graves difficultés. En effet, la théorie doit expliquer pourquoi, dans le monde macroscopique, on ne rencontre que la causalité ordinaire.

Considérons d'abord le cas de deux particules de spin $1/2$ créées dans l'état singulet; nous avons dit que le principe de séparabilité est violé dans ce cas. Selon la théorie de la causalité rétrograde il doit exister dans ce phénomène des connexions causales au moyen de la causalité rétrograde.

Si maintenant l'on passe au cas de deux particules de spin s arbitraire créées dans l'état singulet, on peut montrer que le principe de séparabilité est aussi violé²¹³. A la limite $s \rightarrow \infty$ cependant, nous aurons le cas classique et le principe redevient valable. En effet, on trouve que le domaine d'angles pour lesquels le principe de séparabilité est violé diminue comme $1/s$ ²¹⁴. En conséquence, à la limite $s \rightarrow \infty$ toutes les connexions causales seront réalisées au moyen de la causalité ordinaire. La théorie de la causalité rétrograde doit donc montrer comment la causalité rétrograde "disparaît" à la limite des grandes valeurs du spin. Mais au préalable, il est nécessaire de donner une définition précise de la causalité rétrograde, ce qui n'est pas du tout évident compte tenu du caractère contre-intuitif de cette notion, qui n'exige pas que la cause soit toujours antérieure à l'effet.

II. Refus des influences supralumineuses.

Il existe au moins une théorie qui permet de résoudre les problèmes que pose la violation du principe de séparabilité sans devoir renoncer à la relativité ni invoquer l'existence des influences supralumineuses. Il s'agit de la théorie de la relativité des états d'Everett²¹⁵.

Dans cette théorie, il est postulé que chaque fois qu'un processus de mesure a lieu, le monde réel se divise en autant de mondes réels qu'il y a de valeurs propres distinctes de l'opérateur représentant la quantité mesurée.

Dans le cas, par exemple, de deux particules U et V de spin $1/2$ qui sont créées dans une source S dans l'état singulet, on aura, après la mesure du spin de V deux mondes réels, chacun d'eux contenant un observateur: un monde dans lequel la valeur mesurée est $+1$ et un autre dans lequel la valeur est -1 (en unités de $\hbar/2$)

Nonobstant le fait que chaque expérimentateur n'observe qu'un des résultats, l'autre résultat existe en même temps bien que dans une branche différente de l'univers où l'observe l'autre expérimentateur.

L'argumentation qui nous a conduits à conclure que le principe de séparabilité est violé, se fonde sur la supposition implicite que si l'un des résultats de la mesure du spin de V est observé, l'autre résultat possible n'existe pas. Si ce n'est pas le cas, on peut montrer que la

²¹³ Mermin, N.D. "Quantum Mechanics vs. Local realism near the classical limit: A Bell inequality for spins" **Phys. Rev.** Vol.22, No.2, 15 July 1.980 p.356-361

²¹⁴ Réf. (213)

²¹⁵ Everett, H.; "Relative State Formulation of Quantum Mechanics" **Rev. of Mod. Phys.** Vol 29, No.3, July 1.957 p. 454-462

probabilité d'obtenir un des résultats de la mesure du spin de U n'est affectée dans aucun cas par l'observation d'un des résultats de la mesure du spin de V²¹⁶.

Nous devons remarquer que si la théorie d'Everett permet bien de résoudre les problèmes posés par la non-séparabilité, les notions de base de cette théorie sont encore plus éloignées des conceptions humaines ordinaires que ne le sont pas la non-séparabilité et l'indivisibilité elles-mêmes.

5.2.1. Pourquoi la non-séparabilité est une indication de ce que la réalité n'est pas inscrite dans l'espace-temps.

Dans une conception réaliste de la relativité, l'espace-temps fait partie de la réalité en soi, c'est-à-dire qu'il existe indépendamment de nous-mêmes, de ce que nous connaissons et de ce que nous décidons de mesurer. La réalité s'inscrit dans l'espace-temps. Il existe une distance entre deux éléments de la réalité et des relations causales entre les événements qui forment cette dernière. La cause précède toujours l'effet. Les éléments de la réalité séparés par un intervalle du genre espace sont aussi séparés causalement. En conclusion, la localisation spatio-temporelle et la causalité font partie de la réalité en soi.

La non-séparabilité indique que la réalité ne s'inscrit pas dans l'espace-temps. Examinons cette affirmation en détail.

I. Supposons que l'on n'accepte pas l'existence des influences supralumineuses. Une supposition fondamentale implicite dans la formulation du principe de séparabilité est que la réalité est immergée dans l'espace-temps. Si en dépit de la violation du principe de séparabilité on soutient que la réalité se trouve dans l'espace-temps, il semble inéluctable d'accepter l'existence des influences supralumineuses. Si, tout en assumant une position réaliste, on refuse cette sorte d'influences on ne peut apparemment aboutir qu'à une seule conclusion, qui est d'admettre que l'espace-temps ne fait pas partie de la réalité en soi.

La théorie d'Everett, que nous avons mentionnée n'invoque pas l'existence des influences supralumineuses. Cette théorie, néanmoins, se heurte au grave problème épistémologique posé par l'impossibilité d'observer les différentes branches de l'univers. Il se trouve dans cette théorie une prolifération infinie de non-observables.

II. Supposons maintenant que l'on n'exclut pas l'existence des influences supralumineuses.

Dans ce cas, si l'on continue d'accepter le formalisme relativiste comme une description de la réalité, il est nécessaire de donner, soit une nouvelle interprétation du formalisme en question telle que celle qui postule un éther, soit une nouvelle définition de l'idée de causalité telle que celle qui est implicite dans le postulat de la causalité rétrograde. Si l'on n'accepte aucune de ces suggestions, il semble que la seule issue au paradoxe posé par la possibilité qu'un événement puisse à la fois influencer et être influencé par un autre événement selon le système de référence adopté, est d'admettre que la réalité ne s'inscrit pas dans l'espace-temps.

²¹⁶ Bilbol, M.; "Analysis of the E.P.R. correlations in terms of events" **Phys. Lett.** 96 A No.2 13 June 1983 p.66-70

La théorie la plus élaborée du point de vue conceptuel, parmi celles qui cherchent à donner une explication réaliste des phénomènes quantiques sans changer l'interprétation usuelle du formalisme relativiste, est la dernière théorie proposée par David Bohm.²¹⁷

Nous étudierons en détail les idées de Bohm dans un chapitre postérieur, mais nous pouvons dire dès maintenant qu'il considère la réalité matérielle comme étant composée de particules dans l'espace-temps et d'un champ physique réel qui, comme nous le verrons au chap. 8, ne s'y trouve pas. Ce champ est le responsable des effets non-séparables. Ce n'est pas un champ physique ordinaire porteur de forces, mais plutôt un champ porteur d'information. Nous n'entrerons pas ici dans les détails, tout ce que nous voulons souligner est que la réalité dans la théorie de Bohm n'est pas complètement dans l'espace-temps. C'est seulement ce qu'il appelle "l'ordre développé" de la réalité qui est contenu dans l'espace-temps, tandis que "l'ordre enveloppé" est en dehors de l'espace-temps.

Le postulat de l'existence d'un éther ou celui de la causalité rétrograde, permet-il de concevoir la réalité comme étant contenue dans l'espace-temps?

Dans une première analyse, il peut paraître que la réponse à la question précédente est affirmative. Examinons le sujet de plus près.

Considérons la première spéculation, celle de l'existence d'un éther. Il y a de sérieuses objections épistémologiques à une théorie qui postule une entité en principe impossible à observer et qui, cependant, est invoquée comme explication d'un problème physique fondamental. Einstein considérait comme épistémologiquement incorrecte l'idée de l'espace absolu de Newton car il s'agissait d'une entité qui pouvait exercer une action physique, à savoir les effets inertiels, mais sur laquelle il était impossible d'agir physiquement²¹⁸. L'éther, ou système de référence privilégié, postulé pour expliquer les influences supralumineuses est aussi une entité qui permet d'obtenir des effets physiques mais sur laquelle il n'est pas possible d'agir et qui, en principe, n'est pas observable. Le caractère purement ad hoc de cet éther est d'autre part évident.

D'autres versions de cette idée²¹⁹ dans lesquelles l'invariance de Lorentz n'est qu'une approximation, impliquent clairement que l'espace-temps est aussi une approximation et que, en conséquence, il ne fait pas partie de la réalité en soi.

En ce qui concerne la deuxième spéculation, celle de la causalité rétrograde, nous devons remarquer que la théorie la plus élaborée dans ce sens, celle de O. Costa de Beauregard²²⁰, donne une définition de la causalité dans laquelle la distinction entre cause et effet est perdue. On peut se demander alors si une telle définition correspond vraiment au concept de causalité. Ce qui reste finalement de la dernière élaboration de la théorie de Costa de Beauregard est, comme le souligne d'Espagnat²²¹, une conception dans laquelle la réalité n'est pas inscrite dans l'espace-temps.

Compte tenu des considérations précédentes, nous pouvons affirmer que pour le partisan du réalisme physique d'aujourd'hui, la conclusion la plus raisonnable est de considérer que la

²¹⁷ Bohm, D.; Hiley, B.J. "An Ontological Basis for the Quantum Theory" *Phys. Rep.* 144 No.6 1987 p.323 - 375

²¹⁸ Einstein, A.; **The principle of Relativity** (Dover Publications Inc. London 1952)

²¹⁹ Réf. (210)

²²⁰ Réf. (212)

²²¹ Réf. (200)

réalité ne se trouve pas dans l'espace-temps et que ce dernier, tout comme la causalité ordinaire, n'est qu'une partie de notre cadre conceptuel adapté à la description de notre expérience.

En conclusion, le réaliste rejoint Bohr en une de ses thèses fondamentales: En effet comme nous l'avons vu, Bohr ne considère pas que la causalité et l'espace-temps font partie de la réalité en soi. Il soutient que l'objet de la science n'est pas la description d'une telle réalité, mais seulement la description sans ambiguïté de l'expérience humaine. La causalité et l'espace-temps sont pour lui une partie essentielle du seul langage dont nous disposons pour communiquer sans ambiguïté l'expérience humaine, et forment donc partie du cadre conceptuel destiné à organiser cette expérience.

Nous pouvons maintenant voir plus clairement dans quel sens la non-séparabilité a donné raison à Bohr dans le débat entre celui-ci et Einstein. Il y a deux aspects dans ce débat: un premier qui est centré sur l'idée de la réalité et un second qui gravite autour du concept de séparabilité. Nous étudierons le premier aspect dans le chapitre suivant et parlerons maintenant de l'aspect relatif à la séparabilité.

Les arguments d'Einstein sur l'incomplétude de la mécanique quantique peuvent s'interpréter comme une tentative d'inscrire la réalité microscopique dans l'espace-temps. Nonobstant que pour Einstein les concepts sont, du point de vue logique, des conventions choisies librement et que, par conséquent, nous devons être prêts à les modifier si l'observation de la nature l'exige, remarquable est le statut privilégié qu'il donne aux concepts d'espace-temps et de séparabilité en tant qu'éléments de la réalité en soi. Quelques citations d'Einstein illustrent ce point:

"(...) Nous ne pouvons guère douter de la réalité physique du cône de lumière élémentaire qui appartient à un point."²²²

Quand il parle du paradoxe E.P.R., Einstein se réfère à

"(...) la localisation spatio-temporelle du réel (...)"²²³.

Et dans son autobiographie, quand il s'exprime sur le cas de deux systèmes S et S' qui sont spatialement séparés, il affirme:

"(...) Il me semble que nous pouvons parler de la situation factuelle réelle du système partiel S (...) Mais nous devons, à mon avis, soutenir d'une manière absolue la supposition suivante: La situation factuelle réelle du système S est indépendante de ce que l'on fait au système S' séparé spatialement du premier (...)"²²⁴.

Si nous acceptons que pour un adepte du réalisme physique la non-séparabilité indique que l'espace-temps n'est qu'une partie de notre cadre conceptuel et qu'en conséquence la formulation du principe de séparabilité appliqué aux éléments de la réalité en soi n'a pas

²²² Einstein, A.; "Remarks to the Essays appearing in this Collective Volume" dans **Albert Einstein, Philosopher Scientist**, Vol.II P.A. Schilpp ed. (Open court, La Salle, Illinois, 1970) p.676

²²³ Ref.(222)

²²⁴ Einstein, A.; "Autobiographical Notes" dans **Albert Einstein, Philosopher Scientist**. Vol I, P.A. Schilpp ed. (Open Court, La Salle Illinois. 1970) p.85

de sens strictement parlant, vu que la réalité est en dehors de l'espace-temps, il est évident que c'est Bohr, avec son idée de l'indivisibilité, qui a visé dans la direction correcte.

Il existe un autre point de vue où le réaliste est amené à rejoindre les idées de Bohr. Ce dernier en effet, arrive à la conclusion que le langage classique est inadéquat pour décrire les régularités quantiques. Aux arguments de Bohr, le réaliste a opposé l'argument qu'il n'est pas nécessaire de renoncer aux concepts classiques et en particulier à ceux d'espace-temps et de causalité car d'un point de vue logique on pourrait considérer que la description quantique est fondamentalement incomplète.

Maintenant, la non-séparabilité indique au réaliste que pour comprendre la réalité, il est inéluctable d'aller au-delà du langage dont nous disposons actuellement. Plus précisément, il est nécessaire de dépasser les concepts d'espace-temps et de causalité.

Il est très remarquable que ce soit une idée semblable à celle de l'indivisibilité qui a conduit le partisan du réalisme physique à des conclusions similaires à celles de Bohr, conclusions auxquelles il est arrivé précisément à partir de l'indivisibilité de h.

Nous voyons que les problèmes épistémologiques de Bohr et du partisan du réalisme physique sont essentiellement les mêmes: De même que Bohr, le réaliste doit maintenant choisir entre l'acceptation ou le refus de la possibilité de décrire la réalité en soi en dépassant les concepts fondamentaux dont nous disposons et en particulier ceux de localisation spatio-temporelle et de causalité.

Deux perspectives s'ouvrent alors au réaliste:

I Il peut estimer que la possibilité, qui existe toujours, de créer des concepts fondamentalement nouveaux, permettra de pouvoir un jour postuler de nouvelles entités et qualités au moyen desquelles on arrivera à comprendre la réalité en soi.

II Il peut considérer que même s'il est toujours possible de créer des nouveaux concepts, la violation de deux concepts aussi fondamentaux que la localisation et la causalité est une indication de ce que la réalité n'est pas accessible à notre raison discursive ou, en d'autres termes que la réalité ultime ne peut être décrite par les moyens de description de la science. Dans cette optique réaliste doit considérer la réalité de la façon dont Bohr a accepté l'existence du quantum d'action.

Nous parlerons en détail de ces deux chemins dans le chapitre 8 où nous parlerons des idées de Bohm, lequel choisit le premier chemin et de celles d'Espagnat qui choisit le second.

Il faut remarquer que, bien que Bohr conclue à l'impossibilité d'aller au-delà du langage courant, il propose néanmoins un nouveau mode d'emploi de celui-ci, afin de décrire sans ambiguïté les régularités quantiques.

Pour terminer ce chapitre, nous devons souligner qu'un partisan du réalisme physique qui est cohérent avec les données actuelles est plus près de Bohr que d'Einstein. Et cela, peut-être, sans s'en apercevoir.

CHAPITRE 6

LA REALITE PHYSIQUE SELON BOHR

Dans ce chapitre nous terminerons notre exposé sur les thèses de Bohr en examinant sa conception de la réalité physique. Notre conclusion est que selon ses idées aucun objet physique n'a des propriétés en soi. Une analyse critique de la conclusion de Bohr selon laquelle aucune ontologie n'a de place dans son interprétation de la mécanique quantique montre cependant que la conclusion en question n'est pas contraignante. L'on ne peut pas soutenir en conséquence que c'est Bohr le vainqueur dans le grand débat avec Einstein sur la nature de la réalité physique.

6.1. LA REALITE PHYSIQUE POUR BOHR

Maintenant que nous avons étudié en détail les caractéristiques les plus remarquables de la pensée de Bohr nous pouvons aborder l'aspect qui est peut être le plus subtil de sa thèse et qu'on peut considérer être la synthèse de ses idées, à savoir sa conception de la réalité physique.

En totale cohérence avec ses idées sur l'emploi non-ambigu du langage Bohr soutient que la "réalité physique" est une expression qu'on doit apprendre à utiliser sans ambiguïté. Dans les termes que lui prête Kalckar, Bohr dit:

"Nous ne devons jamais oublier que la 'réalité' est aussi un mot humain tout comme les mots 'onde' ou 'conscience'. Notre tâche est d'apprendre à utiliser ces mots correctement - c'est-à-dire, sans ambiguïté et de façon cohérente."²²⁵

La manière cohérente et sans ambiguïté dont le mot réalité doit s'employer a été exposée par Bohr dans son article de réponse aux objections d'Einstein qui avait proposé comme suffisante le critère suivant de réalité physique:

"Si, sans perturber en aucune manière un système, on peut prédire avec certitude la valeur d'une quantité physique qui s'y rapporte, alors il y a vraiment un élément de la réalité physique qui correspond à cette quantité."²²⁶

L'argument d'Einstein peut être esquissé de la manière suivante.²²⁷

Soit un système S composé de deux particules 1 et 2 décrites par les variables x_1 et x_2 respectivement (un seul degré de liberté). Supposons que les particules ont interagi pendant l'intervalle compris entre $t=0$ et $t=T$ et qu'après $t=T$ il n'y a plus d'interaction. Si la fonction d'onde des particules avant $t=0$ est connue, il est possible de calculer, au moyen de l'équation de Schrödinger, la fonction d'onde du système S à un temps quelconque.

²²⁵ Kalckar, J.; "Niels Bohr and his youngest disciples" dans Rozental, S. Ed. **Niels Bohr: His life and work as seen by his friends and colleagues** (North Holland, Amsterdam. 1967) p.234

²²⁶ Einstein, A.; Podolski, B.; Rosen, N. "Can Quantum Mechanical Description of physical reality be considered complete?" **Phys. Rev.** 47, 1935 p.777-784.

²²⁷ Voir par exemple, Jammer, M.; **The philosophy of Quantum Mechanics** (John Wiley & son, New York. 1974) p.181-184

La fonction d'onde du système S après $t > T$ peut être écrite

$$\Psi(x_1, x_2) = \sum_n \psi_n(x_2) U_n(x_1)$$

où $U_n(x_1)$ sont les vecteurs propres d'une variable A_1 appartenant à 1. Si la mesure de A_1 donne la valeur propre a_n , la fonction d'onde de 2 après l'interaction sera $\psi_n(x_2)$.

Dans le cas d'un spectre continu

$$\Psi(x_1, x_2) = \int_{-\infty}^{\infty} \psi_y(x_1) U_y(x_2) dy$$

où y sont les valeurs propres continues de A_1 .

Si l'état du système S est tel que la fonction d'onde est

$$\Psi(x_1, x_2) = \int_{-\infty}^{\infty} e^{\frac{2\pi i(x_1 - x_2 + x_0)p}{h}} dp$$

où $x_0 =$ constante arbitraire, il peut être démontré que:

- a) Une mesure de l'impulsion de 1 nous permet de prédire avec certitude l'impulsion p_2 de 2 sans perturber en aucune manière le système 2.
- b) Une mesure de la position de 1 nous permet de prédire avec certitude la position q_2 de 2 sans perturber en aucune manière le système 2.

Selon le critère de réalité d'Einstein et al. on doit assigner un élément de réalité à q_2 aussi bien que à p_2 . Etant donné que le formalisme quantique ne permet pas d'assigner une valeur précise (sharp) aux deux variables q_2 et p_2 à la fois on doit conclure que la description quantique est incomplète.

Pour répondre aux objections d'Einstein Bohr considère un cas particulier d'un système composé de deux particules et il reformule l'argument d'Einstein de la manière suivante. Si on représente par q_x la coordonnée d'une particule dans une direction donnée, par p_x son impulsion dans la même direction, et par q_2 et p_2 respectivement la coordonnée et l'impulsion de la deuxième particule dans la même direction, on prouve que la quantité $p_x + p_2$ commute avec la quantité $q_x - q_2$. En accord avec le formalisme quantique il est possible de mesurer avec une précision arbitraire les deux quantités précédentes. Si on mesure alors q_x avec la précision qu'on veut on peut connaître également q_2 avec la précision qu'on veut. La même chose s'applique pour p_x et p_2 . Si les mesures sont faites à un instant où l'interaction entre les deux particules est pratiquement terminée de telle manière qu'il est possible de considérer les particules comme étant libres, il est donc possible de prédire, dans le premier cas, la valeur q_2 sans perturber en aucune manière la deuxième particule et dans le deuxième cas, l'impulsion p_2 sans perturber en aucune manière cette même particule.

Bohr soutient qu'il y a une ambiguïté dans la phrase: «sans perturber en aucune manière

la deuxième particule". Pour montrer cette ambiguïté il décrit un arrangement expérimental qui en principe, est adéquat à la situation.

Considérons un diaphragme avec deux fentes parallèles très étroites par rapport à leur séparation. Deux particules passent de manière indépendante chacune par une fente. Chaque particule a également une impulsion connue. Si l'impulsion du diaphragme est mesurée avant et après le passage des particules il est possible de connaître la somme des impulsions des particules dans la direction perpendiculaire aux fentes. La différence entre les coordonnées des particules dans la même direction est également connue et est donnée par la distance entre les fentes. La mesure subséquente de la position ou l'impulsion d'une des deux particules permettra de connaître la position ou l'impulsion de l'autre particule. Or, pour Bohr, il ne s'agit ici que de

"Une distinction entre des procédés expérimentaux différents qui permettent l'usage non ambigu de concepts classiques complémentaires."²²⁸

En effet: supposons que nous choisissons de mesurer la position de la particule 1. Nous ferons donc, une expérience, qu'on peut appeler *expérience A*, dans laquelle cette position est mesurée. Il sera possible alors de connaître la position de la particule 2. Mais, comme l'on sait, il y aura également un échange incontrôlable d'impulsion entre la particule 1 et l'instrument de mesure. Par conséquent, une mesure subséquente de l'impulsion de la particule 1 ne nous permettra pas de connaître l'impulsion de la particule 2. Pour cela il serait nécessaire de connaître l'impulsion échangée entre la particule 1 et l'instrument de mesure quand on mesure la position de la particule et nous savons que cet échange est incontrôlable.

Supposons maintenant que nous choisissons de mesurer l'impulsion de la particule 1 et pour cela nous faisons une expérience appelée *expérience B* dans laquelle cette impulsion est mesurée. Il serait alors possible de connaître l'impulsion de la particule 2. Mais, à cause de l'interaction entre la particule 1 et l'instrument employé pour mesurer son impulsion il y aura un déplacement incontrôlable de la particule. En conséquence une mesure subséquente de la position de la particule 1 ne nous permettra pas, maintenant, de connaître la position de la particule 2.

Nous voyons, donc, que les conditions de l'expérience A nous permettent d'arriver à des conclusions sur la position de la particule 2 mais nous font perdre la possibilité d'une:

"(...) application sans ambiguïté de l'idée d'impulsion dans des prédictions concernant le comportement de la deuxième particule."²²⁹

De manière similaire les conditions de l'expérience B nous permettent de connaître l'impulsion de la particule 2 mais nous laissent sans aucune base:

"(...) pour des prédictions concernant la position de (...) la particule."²³⁰

En conclusion quand nous faisons une mesure de q_1 ou de p_1 , et par conséquent de q_2

²²⁸ Bohr, N.; "Can quantum Mechanics description of physical reality be considered complete? Phys. Rev. 48, 1.935 p. 696-702

²²⁹ Réf. (228)

²³⁰ Réf. (228)

ou p_2 respectivement, même s'il n'y a aucune interaction directe avec la particule 2, il y a en revanche une influence sur les conditions qui définissent les types possibles de prédictions relatives au comportement futur de cette particule. En cela consiste d'après Bohr, l'ambiguïté de la phrase "sans perturber en aucune manière le système". Comme il l'écrit :

"Evidemment, il n'est pas question dans un tel cas d'une perturbation mécanique du système étudié pendant le dernier stade, critique, du processus de mesure. Mais même à ce stade, la question est celle *d'une influence sur les conditions, mêmes qui les types possibles de prédictions au comportement futur du système*. Comme ces conditions constituent un élément inhérent à la description de tout phénomène auquel le terme de 'réalité physique' puisse être attaché à juste titre, nous voyons que l'argumentation des auteurs cités ne justifie pas leur conclusion que la description de la mécanique quantique est essentiellement incomplète."²³¹

Dans le dernier passage de la citation précédente est formulé ce qu'on peut considérer comme le critère de réalité de Bohr. Pour lui tout phénomène auquel il est possible d'attacher sans ambiguïté l'expression "réalité physique" doit contenir comme élément inhérent les conditions qui définissent les types de prédictions qu'il est possible de faire sur le comportement futur du système en question. C'est -à -dire, pour parler de réalité physique d'un phénomène il est indispensable de prendre en compte tout l'arrangement expérimental. Il n'est pas possible donc, dans la situation décrite par Einstein de parler de 3a réalité physique de, par exemple q_2 sans décrire l'arrangement expérimental pour mesurer q_2 .

Au chapitre 4 nous avons conclu que selon les thèses de Bohr toutes les propriétés d'un objet quantique, même l'existence, sont des propriétés dépendantes.

Quelle est la situation avec les objets macroscopiques? Peut-on dire que Bohr est un *macro-objectiviste*, c'est - à- dire que pour lui les éléments fondamentaux, les éléments réels, sont les objets macroscopiques? Une telle prise de position entraîne beaucoup de problèmes, dont le plus évident est qu'en définitive un objet macroscopique est conçu comme constitué d'éléments microscopiques. Comment un objet macroscopique peut-il avoir des propriétés indépendantes si les éléments microscopiques qui le composent n'ont pas des propriétés en soi?

L'étude que nous avons faite au chapitre 4 montre clairement que Bohr n'est pas un macro-objectiviste. Selon ses thèses l'"intérieur" d'un phénomène quantique n'a pas de propriétés en soi. Et ce qui décide si un objet est un aspect de l'"intérieur" d'un phénomène quantique n'est pas la nature macroscopique mais les actions mises en jeu par rapport à l'objet. Si les actions mises en jeu sont de l'ordre de h l'objet doit être considéré comme un aspect de l'"intérieur" d'un phénomène quantique. Par contre, dans toutes les circonstances où les actions mises en jeu par rapport à un objet macroscopique sont beaucoup plus grandes que h ,comme c'est le cas quand il est employé comme un instrument de mesure ou quand il se trouve dans les circonstances de la vie journalière l'objet peut être décrit par le langage commun dans le mode normal et nous pouvons nous référer à lui en lui attribuant l'idée ordinaire de réalité physique , c'est-à-dire , en soi ou indépendante.

Or si l'objet macroscopique doit être considéré, dans certaines circonstances comme un

²³¹ Réf. (228) (Souligné par Bohr lui-même)

aspect de l'"intérieur" d'un phénomène quantique cela veut dire que dans les circonstances en question il doit être considéré comme dépourvu des propriétés en soi. Mais si l'objet a des propriétés indépendantes dans certaines circonstances et des propriétés dépendantes dans d'autres circonstances il est clair que ses propriétés "indépendantes" des circonstances ou plus précisément dépendent des actions mises en jeu par rapport à lui. En conséquence ses propriétés indépendantes ne sont pas vraiment indépendantes.

Une conclusion de notre analyse semble inéluctable: *Selon les thèses de Bohr, aucun objet n'a pas de propriétés en soi.*

Nous devons ici faire référence aux expériences proposées récemment par Leggett²³² lesquelles peuvent montrer si la mécanique quantique est valable dans le domaine macroscopique. Leggett souligne que les expériences ordinaires avec les soi-disant "systèmes macroscopiques quantiques" tels que les supraconducteurs ou les superfluides prouvent seulement que de grands assemblages d'atomes obéissent aux lois de la mécanique quantique de la même façon que les atomes individuels isolés, et que quelquefois un nombre macroscopique d'atomes peut se comporter en corrélation et produire un résultat macroscopique. Il propose des expériences pouvant mettre en évidence une superposition d'états quantiques avec des variables macroscopiques différentes. Une telle superposition est appelée "cohérence quantique macroscopique". Leggett suggère d'utiliser un anneau supraconducteur interrompu par une jonction de Josephson (SQUID), la variable macroscopique étant le flux magnétique piégé dans l'anneau.

Les résultats de ces expériences permettront de décider expérimentalement sur la validité de la complémentarité étendue aux corps macroscopiques c'est-à-dire sur la validité des idées de Bohr sur les propriétés des corps macroscopiques.

Il existe une manière plus technique d'exprimer la thèse selon laquelle aucun objet n'a de propriétés en soi. Pour le faire étudier brièvement l'utilisation que fait d'Espagnat des définitions partielles pour interpréter les idées de Bohr. Nous esquissons ici l'interprétation de d'Espagnat²³³.

Les implications contrafactuelles

La logique formelle ordinaire n'admet que l'implication matérielle (si..., alors...). Il y a, néanmoins, d'autres logiques qui admettent d'autres types d'implication. Les logiques modales introduisent la notion d'implication stricte. Elles prennent en compte la notion de nécessité car elles font une différence entre une proposition qui est *contingemment* vraie comme "j'ai assisté au séminaire de 17 heures" et une autre qui est *nécessairement* vraie comme "deux plus deux font quatre."

Une implication stricte est celle qui est nécessaire. Il y a bien entendu plusieurs types de nécessité. Nous ne prenons en compte que la nécessité physique, c'est-à-dire que nous considérons seulement les implications qui sont nécessaires compte tenu des lois de la physique.

²³² Voir par exemple Leggett, A.J. "Macroscopic Quantum Systems and the Quantum Theory of Measurement" **Supp. of the Prog. of Theo. Phys** 69, 1980 p.80-100

²³³ d'Espagnat, B.; **A la recherche du réel** (Gauthier - Villars, Paris, 1.970). Chap.12

Si une implication est stricte, c'est à dire s'il est nécessaire qu'une circonstance A implique un événement B, l'on peut considérer que même si A n'est pas produite l'affirmation "Si A était réalisée B se produirait" a un sens. Cette affirmation est dans notre hypothèse (A non réalisée en fait) une implication contrafactuelle.

Il est facile de constater que pratiquement toutes les propriétés que nous attribuons aux objets physiques de manière spontanée et intuitive dans la vie journalière, leur sont attribuées par nous sur la base d'implications contrafactuelles.

Les implications contrafactuelles peuvent aussi être considérées comme essentielles au réalisme. Comme l'écrit d'Espagnat:

"(...) quand je dis, par exemple que ma voiture existe réellement, aussi bien de nuit que le jour, qu'ai-je au fond dans l'esprit sinon l'idée que, même lorsque je me trouve dans mon lit la nuit je pourrais si je le voulais (bien qu'en général je ne le fasse pas) regarder par la fenêtre et constater alors sa présence, au bord du trottoir?²³⁴

Les définitions partielles

Il existe, cependant, une autre manière de définir les propriétés d'un objet, manière qui élimine en grande partie toute contrafactualité. Il s'agit de la méthode des définitions partielles.

Les définitions partielles furent proposées par Carnap pour résoudre la difficulté posée par l'impossibilité d'employer l'implication matérielle pour définir les termes de disposition.

Par ce non on désigne tout terme qui est défini comme une disposition d'un objet à réagir de telle ou telle manière ou à engendrer tels ou tels effets lorsqu'il est placé dans telles ou telles circonstances. Un exemple est le terme magnétique. On aimerait que la qualification de magnétique appliqué à un objet x puisse être opérationnellement défini en termes de logique formelle ordinaire au moyen de l'implication matérielle:

"Si des brins de limaille de fer se trouvent au voisinage de x alors ceux-ci sont attirés"

Mais, selon les propriétés de l'implication matérielle la proposition

"si x alors y".

est vraie:

- a) Si x et y sont toutes les deux vraies.
- b) Si x est fausse.

En conséquence tout objet x auprès duquel il n'y a pas de limaille de fer serait *ipso facto* magnétique. Cela évidemment ne correspond pas à l'idée d'un corps magnétique.

²³⁴ d'Espagnat, B.; Une incertaine Réalité (Gauthier- Villars, Paris. 1.985) Chap.10

Carnap a proposé une définition partielle du terme magnétique, laquelle ne soulève pas les problèmes de l'implication matérielle.

"Si des brins de limaille de fer se trouvent au voisinage de x alors x est magnétique si et seulement si cette limaille est attirée."

La définition s'appelle partielle car elle ne définit le terme magnétique que dans le cas où l'on trouve de limaille de fer au voisinage de x . Carnap et Hempel proposent donc de multiplier les définitions partielles d'un même terme.

Les définitions partielles et les thèses de Bohr

d'Espagnat a souligné une parenté profonde entre l'idée de Carnap de n'employer que les définitions partielles pour définir les propriétés d'un objet et la thèse de Bohr de la nécessité de se référer à une situation expérimentale concrète pour définir les propriétés données d'un objet microscopique. En effet, si pour définir, une propriété donnée d'un objet microscopique nous devons prendre en compte les conditions expérimentales, il est clair que la procédure de définition au moyen de l'implication contrafactuelle est impossible d'appliquer. Nous ne pouvons ni évoquer des mesures qui ne sont pas faites ni même celles qui ne sont pas destinées à être faites. La méthode des définitions partielles est une technique précise qui permet de définir les propriétés d'un objet microscopique en conformité avec la thèse de Bohr.

Nous pouvons maintenant exprimer la conclusion à laquelle nous sommes arrivés ci-dessus en disant: Selon les thèses de Bohr les propriétés de *tout* objet physique doivent être définies au moyen de définitions partielles.

La formulation précédente permet de voir plus clairement les problèmes épistémologiques et philosophiques auxquels se heurte la position de Bohr.

Un problème épistémologique qui se présente quand aucun énoncé contrafactuel n'est admis pour les corps macroscopiques est qu'il est difficile de préciser la distinction entre une loi scientifique et une généralisation accidentelle comme par exemple: "Dans tous les cas où un objet est en or pur on observe qu'il a une masse inférieure à 100.000 Kg".²³⁵

Selon certain épistémologues la différence est qu'une loi scientifique peut servir à corroborer une affirmation contrafactuelle. L'élimination des implications contrafactuelles ne permettrait donc pas de préciser la distinction en question.

D'autre part, si l'interprétation que nous avons donnée de Bohr est correcte, il est naturel d'avoir dans l'esprit quelques questions très simples qui demandent de façon urgente une réponse. Ainsi nous pouvons nous demander quelles sortes de réponse aurait donné Bohr à des questions telles que les suivantes:

Les objets que nous regardons continueront-ils à exister si nous sortons de la salle?

Si tous les habitants de Paris quittent la ville, continuerait-elle à exister?

²³⁵ Hempel, G.; **Eléments d'Epistémologie**. (Albin Michel, Paris) cité par d'Espagnat dans la Réf. (233)

Si personne ne l'observe, le feu de la cheminée brûlerait-il? Le soleil, se lèvera-t-il demain?

L'étoile existait-elle avant que sa lumière n'arrivât aux yeux du premier homme qui l'a observée?

Pour être cohérent avec les thèses de Bohr, telles que nous les interprétons, l'on devrait répondre que les questions précédentes n'ont pas de sens car aucune situation expérimentale n'est définie qui permettrait de leur répondre.

Malheureusement il semble qu'il n'existe aucune citation de Bohr qui permette de dire quelle serait la réponse qu'il aurait donnée aux questions précédentes. Il semble que Bohr n'ait pas voulu parler des questions qui, comme les précédentes, sont de nature ontologique. A. Petersen suggère que toute ontologie est étrangère à la pensée de Niels Bohr.²³⁶

Les raisons de ce rejet implicite de Bohr de toute sorte d'ontologie, l'on peut les trouver dans les citations suivantes.

"Nous ne renonçons à une représentation intuitive que pour l'état des objets atomiques, et nous conservons entièrement les bases d'une description des conditions expérimentales, ainsi que la liberté de choisir celle-ci.(...) Etant donné l'influence de la conception mécaniciste de la nature sur la pensée philosophique, il est compréhensible que l'on ait vu parfois dans la notion de complémentarité une référence à l'observateur subjectif, qui serait incompatible avec l'objectivité de la description scientifique. Dans tout domaine d'expérience, il faut évidemment conserver une distinction nette entre observateur et contenu des observations. Mais nous devons aussi nous rappeler que la découverte du quantum d'action a jeté une lumière nouvelle sur les fondements mêmes de la description de la nature, et qu'elle a révélé des conditions préalables, jusqu'alors inaperçues, de l'usage rationnel des concepts sur lesquels repose la communication de l'expérience.

Comme nous l'avons vu, il est indispensable, pour définir les phénomènes en physique quantique, de tenir compte du fonctionnement des instruments de mesure et il faut, pour ainsi dire, établir entre le sujet et l'objet une distinction telle qu'elle assure, dans chaque cas particulier, une application sans ambiguïté des concepts physiques élémentaires servant à sa description ".²³⁷

"Nous gardons évidemment la liberté d'expérimentation admise par la physique classique, c'est-à dire le libre choix des dispositifs d'expérience, auquel la structure mathématique du formalisme quantique offre toute latitude."²³⁸

"En mettant en évidence la nécessité, dans une communication sans ambiguïté, de tenir compte du point où se situe la séparation entre le sujet et l'objet les développements modernes de la science ont créé une base nouvelle pour l'usage des mots tels que connaissance et croyance."²³⁹

²³⁶ Petersen A; **Quantum Physics and the Philosophical Tradition** (M.I.T. Press, Cambridge, Mass 1.968

²³⁷ P.p.136-137

²³⁸ P. p.111

²³⁹ P. p.122

"Puisque l'on parle parfois, dans la littérature philosophique, de différents niveaux d'objectivité, de subjectivité, ou même de réalité, on peut souligner ici que la notion d'un sujet ultime -aussi bien que des concepts comme ceux de réalisme et d'idéalisme - n'ont pas de place dans une description objective telle que nous l'avons définie."²⁴⁰

Si l'on prend en compte l'analyse de la pensée de Bohr que nous avons développé dans les chapitres précédents et si l'on utilise la terminologie introduite au chapitre 4, il est possible de comprendre les citations précédentes, de la manière suivante:

A. Nous avons dit que pour Bohr toute mesure entraîne un effet irréversible d'amplification. Le sujet particulier et sa conscience ne sont pas nécessaires pour "clôturer" un phénomène. L'expérimentateur doit choisir ses instruments et l'aspect de l'"intérieur" à révéler dans l'expérience, mais une fois son choix fait, il n'est plus nécessaire.

B. La totalité d'un phénomène quantique implique l'indivisibilité entre l'"intérieur - objet" et l'instrument. La "frontière" entre eux est mouvante.

C. L'expérimentateur et l'instrument peuvent être considérés comme le "sujet". L'expérimentateur choisit l'instrument et en conséquence l'"intérieur-objet". Des choix différents de l'expérimentateur produiront des "intérieurs-objets" différents. Il peut donc être dit que la frontière entre le sujet et l'objet est mouvante dans un phénomène quantique.

D. Pour parler d'ontologie et de concepts comme ceux de réalisme et d'idéalisme il est nécessaire d'avoir une frontière fixée entre le sujet et l'objet, c'est-à-dire, il est nécessaire de définir un sujet et un objet ultimes.

En conclusion, des considérations ontologiques n'ont pas de place dans l'analyse d'un phénomène quantique.

Nous ferons dans la section 6.3. une étude critique des raisons qu'a Bohr pour se refuser à prendre en compte toute considération ontologique dans l'analyse des phénomènes quantiques. Mais avant cela nous présentons ici la mécanique quantique sur la base de notre interprétation des idées principales de Bohr. Dans notre présentation nous ne ferons pas appel à des mots tels que "interaction", "perturbation", "états", etc., qui peuvent donner l'idée incorrecte d'un contenu ontologique dans la pensée de Bohr. Etant donné que nous avons déjà présenté les arguments sur lesquelles se fondent les affirmations qui vont suivre, nous serons très schématiques.

²⁴⁰ P.p.119

6.2. LA MECANIQUE QUANTIQUE SANS ONTOLOGIE, NI PROPRIETES INDEPENDANTES, NI INTERACTION, NI PERTURBATIONS, NI MESURES, NI REDUCTION DE LA FONCTION D'ONDE NI RIEN D'AUTRE DE SIMILAIRE ²⁴¹

I. Critère de scientificité

L'utilisation d'un langage dénué d'ambiguïté est une condition *sine qua non* de la science. Une description objective de l'expérience n'est rien d'autre qu'une communication sans ambiguïté.

II. L'unicité du langage courant

Le seul langage dont nous disposons et dont nous disposerons pour toujours pour une communication sans ambiguïté est le langage courant; les éléments de ce langage nécessaires pour rendre compte de toute expérience physique objective sont: La localisation dans l'espace et le temps et la causalité, entendue comme le déterminisme de la physique classique.

Les mathématiques ne constituent qu'un raffinement du langage courant.

III. Acceptation de h . L'indivisibilité

Il est impossible d'expliquer l'existence de h au moyen du langage courant. Etant donné que celui-ci est le seul langage non ambigu, nous devons accepter h et sa propriété fondamentale: l'indivisibilité, comme des faits qui ne s'expliquent ni requièrent d'explication.

L'indivisibilité signifie qu'un phénomène quantique est un tout indivisible, comprenant l'appareil de mesure.

IV. Le mode complémentaire de description

Etant donné qu'un phénomène quantique est une totalité indivisible le sens d'un concept ne peut être défini qu'au moyen d'une expérience concrète, et le concept ainsi défini ne peut pas être ensuite utilisé sans précaution pour rendre compte de ce qui se passe au cours de telle ou telle autre expérience.

L'indivisibilité entraîne l'existence des expériences mutuellement exclusives qui définissent des concepts eux-mêmes mutuellement exclusifs.

Des concepts mutuellement exclusifs mais nécessaires pour épuiser toute l'information sur un objet sont complémentaires.

Le mode complémentaire de description est la manière d'employer le langage courant au moyen de concepts complémentaires.

Dans tout phénomène quantique nous devons faire une différence fondamentale entre

²⁴¹ Le titre un peu inusité de cette section a été inspiré par celui d'un article de J. Bell intitulé "Quantum Field Theory without observers, or observables, or measurements, or systems, or apparatus, or wave function collapse or any thing like that" **Report to Istituto Italiano per gli Studi Filosofici**, Amaldi. 1.984

l'instrument de mesure, lequel doit être décrit par le langage courant dans le mode normal de description, et l'"intérieur" du phénomène qui doit être décrit dans le mode complémentaire de description. L'"intérieur" du phénomène se manifeste dans chaque expérience par un effet irréversible d'amplification dans l'appareil. C'est au moyen de cet effet que nous obtenons l'information sur l'"intérieur" du phénomène.

L'"objet" quantique est l'aspect de l'"intérieur" qui reste constant entre deux phénomènes complémentaires et auquel on réfère les concepts complémentaires. L'"intérieur" du phénomène n'a pas de propriétés en soi. La "frontière" entre l'instrument et l'"intérieur" est mouvante.

V. *La clôture du phénomène*

Toute observation entraîne un effet irréversible d'amplification. Tout phénomène doit être "clôturé" par cet effet irréversible.

Les concepts thermodynamiques sont complémentaires des concepts dynamiques. L'irréversibilité est en conséquence un concept à objectivité faible.

VI. *La fonction d'onde et le formalisme quantique*

La mécanique quantique a un caractère statistique inhérent. La fonction d'onde Ψ et le formalisme quantique constituent un procédé purement symbolique pour décrire les lois statistiques qui gouvernent les observations obtenues dans des circonstances spécifiées.

VI. *La réalité*

L'indivisibilité d'un phénomène quantique implique que l'"intérieur" n'a pas de propriétés en soi. La "frontière" mouvante entre l'"intérieur" et l'appareil entraîne pour un corps macroscopique impliqué dans un phénomène quantique la possibilité de devenir un aspect de l'"intérieur."

Si les actions mises en jeu relativement à un objet macroscopique sont beaucoup plus grandes que h nous pouvons décrire celui-ci au moyen du mode normal de description et lui attribuer une réalité physique au sens classique. Si par contre les actions en jeu sont de l'ordre de h l'objet macroscopique doit être considéré comme partie de l'"intérieur" d'un phénomène quantique.

La "réalité" est un mot que nous devons apprendre à employer sans ambiguïté. Pour parler de la réalité physique d'un phénomène il est indispensable de prendre en compte tout l'arrangement expérimental. Cet arrangement définit les types possibles de prédictions que l'on peut faire relativement au phénomène.

VII. *Une ontologie n'a pas de place dans la science physique.*

Pour avoir une ontologie, pour pouvoir parler de réalisme ou d'idéalisme, il est nécessaire d'avoir une frontière définie entre le sujet et l'objet. Avec un sujet ultime on peut se demander quelle est la relation entre le sujet et l'objet. Dans un phénomène quantique cette frontière n'est pas fixée et nous ne pouvons pas parler d'un sujet ultime. En conséquence, les notions ontologiques n'ont pas de place ici. La conclusion précédente ne limite pas la portée de la science physique puisque l'objectif de cette dernière est

l'augmentation et l'ordonnement de l'expérience humaine communicable sans ambiguïté.

6.3. ANALYSE CRITIQUE

La thèse de Bohr est fondée sur une supposition linguistique qu'il n'a pas justifiée: l'unicité du langage courant.

Si l'on refuse cette supposition on ne peut pas soutenir qu'il est impossible d'expliquer l'existence de h et l'on ne peut non plus dire qu'il n'est pas possible de séparer conceptuellement l'instrument de mesure de l'objet quantique. La prescription d'utiliser les concepts du langage commun seulement au moyen d'une expérience concrète ne peut non plus être maintenue.

Nous pouvons par exemple, en refusant l'idée de l'unicité du langage courant, concevoir une réalité physique qui existe indépendante de nous et qui sera en dernier lieu l'explication des propriétés des phénomènes quantiques, et nous pouvons essayer de trouver un nouveau langage pour le décrire et expliquer cette réalité.

Même si l'on accepte que le langage courant est le seul dont nous disposerons pour toujours, on peut, en refusant la prescription bohrienne sur la définition du sens des concepts, concevoir une ontologie. Considérons, en effet la théorie de de Broglie-Bohm²⁴². Nous en parlerons davantage dans le chapitre 8 mais nous pouvons dire ici que dans cette théorie il est considéré que la particule et la fonction d'onde sont des entités en soi, qui existent indépendamment de l'observateur. Même si la théorie a ses propres problèmes, même si l'on peut soutenir qu'il s'agit d'une immunisation non réussie²⁴³ il est de fait qu'elle peut reproduire sur une base ontologique toutes les prédictions de la mécanique quantique. Et les notions introduites, même si elles sont nouvelles, ne sont néanmoins que des raffinements de notions qui existent déjà dans le langage classique.

Un autre contre-exemple est constitué par la modalité d'existence proposée par Shimony²⁴⁴. Cet auteur fait appel aux notions aristotéliennes de *puissance* (potentia) et *acte*. Heisenberg, d'une façon ou d'une autre a reconnu la possibilité d'une interprétation réaliste de la mécanique quantique selon les lignes que propose Shimony, mais, comme nous le verrons dans le chapitre 7, la position de Heisenberg n'est pas exempte d'ambiguïté à ce sujet.

Bohr nous dit que les données sur l'"intérieur" des phénomènes quantiques ne peuvent, en général, être combinées dans une image unique. Nous devons, en conséquence, organiser l'expérience quantique au moyen du mode complémentaire de description.

²⁴² de Broglie, L.; "Sur la possibilité de relier les phénomènes d'interférence et la diffraction à la théorie des quanta de lumière" **Comptes Rendus** 18.3, 1926 p. 447-448; "La structure de la matière et du rayonnement et la mécanique ondulatoire" **Comptes Rendus** 184» 1927. p.273-274; "La mécanique ondulatoire et la structure atomique de la matière et du rayonnement" **Journal de Physique et du radium** 8, 1927, p.225 -244. Bohm, D. "A suggested interpretation of the quantum theory in terms of 'hidden variables'", Part I, **Phys. Rev.** 85, 1952 p.166-179, Part II **Phys. Rev.** 85 1952 p.180-193

²⁴³ Réf(233)

²⁴⁴ Shimony, A.; "Physical and Philosophical Issues in de Bohr- Einstein Debate" dans Feshbach, H.; Matsui, T.; Oleson, A.; Ed. **Niels Bohr: Physics and the World** (Harwood Académie Publishers,1988)

Shimony suggère que l'on peut combiner les données en question dans une seule image réaliste en invoquant une modalité d'existence qu'il appelle potentialité. Dans cette image certaines propriétés d'un objet quantique sont actualisées mais pour la plupart elles ont le statut de potentialités. Cette image de la réalité se heurte, certes, au problème de l'*actualisation* des potentialités qui en essence est le même problème que celui de la réduction de la fonction d'onde.

Ces deux contre-exemples montrent que même si l'on accepte la thèse de Bohr sur l'unicité de langage il ne s'en suit pas que l'on doit nécessairement renoncer à trouver une ontologie qui explique les phénomènes quantiques.

L'analyse précédente indique que le refus d'ontologie de Bohr n'est pas contraignant. Nous pouvons nous demander si il n'y pas une réalité transcendante aux phénomènes et qui serait, à la fin, l'explication de l'accord intersubjectif et de la régularité des phénomènes. Le désir de trouver une ontologie qui puisse s'adapter aux faits est un désir naturel de la pensée et il n'est pas clair dans les idées de Bohr pourquoi un tel propos doit être considéré comme dénué de sens. Ce désir d'ontologie se fait plus aigu si l'on accepte l'interprétation que nous avons présentée au chapitre 4 selon laquelle Bohr vise une réalité extérieure qui serait structurée selon le mode complémentaire. On se demande, en effet, quelle sorte d'explication on peut trouver pour l'interdépendance entre cette réalité extérieure et nous mêmes. Dans une conception réaliste on invoque la réalité en soi comme raison d'être de cette interdépendance. Mais si l'on refuse de chercher une ontologie de quelle façon peut-on expliquer l'interdépendance dont il s'agit?

Nous voyons donc que même si Bohr a raison sur Einstein en ce qui concerne la séparabilité et, en général, l'inscription dans l'espace-temps, nous ne pouvons pas affirmer qu'il a raison en ce qui concerne la différence fondamentale entre eux sur l'idée de réalité.

L'idée de réalité indépendante semble être pour Einstein la plus fondamentale. Bohr arrive à la conclusion qu'une ontologie n'a pas de place dans la physique quantique. Nous avons analysé à la fin de la section 6.2. les arguments de Bohr à ce sujet. Ils se fondent sur l'indivisibilité, et cette dernière dérive de l'impossibilité d'expliquer l'existence de h au moyen des concepts du langage courant et de l'unicité du langage courant. Nous voyons que le refus ontologique de Bohr se base sur sa thèse de l'unicité du langage courant laquelle il n'a pas justifié. En conséquence, nous ne pouvons pas dire qu'il soit le vainqueur final dans la grande dispute avec Einstein.

Conclusions finales

La première conclusion est que Bohr n'a pas construit un système strictement cohérent de pensée. Lui-même explique son intention dans la préface de son deuxième livre d'essais en affirmant que la collection d'articles présentée là

"(. . .) a pour thème général *la leçon d'épistémologie que nous a donnée le développement moderne de la physique atomique*, et son application à l'analyse et à la synthèse en divers domaines de la connaissance humaine"²⁴⁵.

Nous devons en conséquence regarder sa thèse seulement comme une *leçon*

²⁴⁵ P. p.vii (Souligné par J.R.CH.)

d'épistémologie constituée fondamentalement par plusieurs *intuitions* que strictement Bohr n'a pas justifiées totalement.

Selon notre analyse ces intuitions sont:

- A. L'unicité du langage courant.
- B. L'indivisibilité des phénomènes quantiques.
- C. Le mode complémentaire de description.
- D. La science exclusivement conçue comme une épistémologie sans aucun caractère ontologique.

Nous avons décrit la relation entre ces intuitions et nous les avons soumises à une analyse critique. Parmi elles l'indivisibilité est peut-être la plus remarquable. En effet les dernières données de la physique aussi bien théoriques qu'expérimentales, ont confirmé la valeur de cette intuition, dans ce sens que même d'un point de vue réaliste nous devons accepter l'existence d'une sorte de *totalité* des phénomènes quantiques qui va tout à fait dans la direction envisagée par Bohr.

Le mode complémentaire de description est aussi une remarquable intuition épistémologique de Bohr car il constitue vraiment un cadre conceptuel adéquat pour parler de l'expérience quantique d'une façon exempte d'ambiguïté. Très significatives dans ce sens sont les intuitions de Bohr sur la complémentarité entre les lois thermodynamiques et les lois mécaniques comme une solution - de nouveau épistémologique - au problème de l'irréversibilité.

Nous avons soutenu que la thèse de Bohr sur l'unicité du langage constitue la pierre angulaire de sa pensée. Ses idées sur le langage sont étroitement liées à sa dernière intuition (D) que nous pouvons reformuler en disant qu'il s'agit d'une thèse selon laquelle la science physique est dépourvue de la possibilité de décrire la réalité en soi.

Que pouvons-nous dire des intuitions bohriennes sur le langage?

En premier lieu, vu que nous ne disposons ni d'une interprétation réaliste du formalisme quantique qui soit exempte de problèmes conceptuels, ni d'une théorie construite sur une base réaliste, c'est-à-dire fondée sur l'objectivité forte, qui ait tout le pouvoir de prédiction de la mécanique quantique et qui ne puisse pas être considérée d'un point de vue épistémologique comme une immunisation non réussie, nous ne pouvons pas affirmer que les thèses de Bohr sur le langage aient été réfutées.

Compte tenu de la situation actuelle dans la physique quantique nous pouvons dire que les tentatives pour construire une physique quantique sur la base de l'objectivité forte semblent être loin de leur but. Il est très significatif de constater, d'autre part, que la physique d'aujourd'hui telle qu'elle est pratiquée pour la plupart des physiciens est orientée précisément dans la direction indiquée par Bohr. Et cela même si beaucoup des praticiens ne sont pas totalement conscients de ce fait.

Notre dernière conclusion est qu'une étude sur la possibilité de donner un contenu ontologique à la physique quantique demande non seulement des recherches scientifiques

dans le sens ordinaire du mot "scientifique", mais aussi dans le sens plus large que nous avons suggéré dans le premier chapitre, c'est-à-dire des recherches sur les conditions mêmes permettant de faire de la science, des recherches sur le langage, sur son usage non-ambigu et sur la possibilité de créer de nouveaux concepts qui permettent de décrire sans ambiguïté la réalité en soi ou de trouver une manière d'interpréter les données de la science dans un sens objectif fort.

CHAPITRE 7

LES IDEES DE HEISENBERG. L'INTERPRETATION DE COPENHAGUE

Bohr et Heisenberg sont considérés comme les fondateurs de l'interprétation "orthodoxe" de la mécanique quantique, interprétation qui est connue par le nom d'interprétation de Copenhague. Si cette interprétation existe il est raisonnable de dire qu'elle ne peut être que l'intersection entre les thèses de Bohr et Heisenberg. Nous analyserons dans ce chapitre les idées de Heisenberg et notre analyse nous conduira à la conclusion de que strictement il n'existe pas une interprétation de Copenhague, c'est-à-dire que l'intersection de 3 thèses de Heisenberg et Bohr ne constitue pas vraiment une interprétation du formalisme quantique. Nous proposerons que l'on parle soit de l'"interprétation de Bohr" soit de l'"interprétation de Heisenberg" quand on veut se référer aux "interprétations orthodoxes" de la mécanique quantique.

7.1. LE ROLE DU LANGAGE POUR HEISENBERG. L'UNICITE DU LANGAGE COURANT.

Heisenberg est du même avis que Bohr au sujet du langage. Il considère que le langage courant suffisamment raffiné par la physique classique, est le seul qui permet une communication scientifique et de la même façon que Bohr il ne présente guère d'arguments pour étayer ses affirmations tout aussi contraignantes que celles de Bohr:

"Ces concepts sont les seuls outils nous permettant d'échanger sans ambiguïté nos pensées sur les phénomènes, sur l'organisation des expériences et leurs résultats. (...) Si le physicien abandonnait cette base, il perdrait le moyen de s'exprimer sans ambiguïté et ne pourrait poursuivre sa recherche scientifique."²⁴⁶

"Toute expérience de physique, qu'il s'agisse de phénomènes de la vie quotidienne ou de phénomènes atomiques, se décrit forcément en termes de physique classique. Les concepts de physique classique forment le langage grâce auquel nous décrivons les conditions dans lesquelles se déroulent nos expériences et communiquons leurs résultats. *Il nous est impossible de remplacer ces concepts par d'autres et nous ne devrions pas le tenter.*"²⁴⁷

"(...) l'on a parfois suggéré qu'il faudrait s'écarter totalement des concepts classiques et qu'un changement révolutionnaire des concepts utilisés pour décrire les expériences pourrait peut-être nous ramener à une description non statistique et complètement objective de la Nature.

Mais cette hypothèse repose sur une erreur d'interprétation. Les concepts de la physique classique ne sont qu'un raffinement des concepts de la vie journalière et sont une partie essentielle du langage qui forme la base de toutes les sciences de la Nature. Notre situation en science est telle que nous utilisons *en fait* les concepts classiques pour décrire les expériences; et le problème posé à la mécanique quantique était de découvrir sur cette base une interprétation théorique des expériences. Il est inutile de discuter de ce qui pourrait se faire si nous étions

²⁴⁶ Heisenberg, W.; **Physique et Philosophie** (Albin Michel, Paris, 1970) p. 187

²⁴⁷ Réf. (246) p.35 (Souligné par J.R.CH.)

d'autres êtres; nous en sommes arrivés à comprendre que, comme l'a dit Weizsäcker, 'la Nature a précédé l'homme, mais l'homme a précédé les sciences de la Nature.' La première partie de la phrase justifie la physique classique avec son idéal de complète objectivité; la seconde partie nous dit pourquoi nous ne pouvons échapper au paradoxe de la théorie quantique, à savoir la nécessité d'utiliser les concepts classiques."²⁴⁸

Nous devons nous rappeler que d'après Heisenberg (citation (32) Chap. 2) Bohr aurait fait des affirmations sur des formes *fondamentales* de la logique indépendantes de l'homme et appartenant à la réalité. Ces affirmations peuvent être considérées comme l'esquisse d'un argument visant à appuyer sa thèse de l'unicité du langage courant. Nous avons dit que si l'on peut argumenter que Bohr était en définitive un réaliste, la base d'une telle argumentation serait sa thèse linguistique. Il vaut la peine d'explorer les idées de Heisenberg sur la philosophie de Kant afin de voir s'il présente un argument qui puisse défendre ses thèses linguistiques. Etant donné que Heisenberg, comme nous le verrons dans la section suivante, n'écarte pas la possibilité d'une interprétation ontologique de la mécanique quantique, on espère de lui beaucoup plus de liberté que Bohr à trouver des arguments même ontologiques pour soutenir ses thèses.

Heisenberg fait une réinterprétation intéressante de la théorie des "a priori" de Kant en remarquant que dans la pratique les concepts classiques constituent une sorte d'*a priori* indispensable pour observer les événements atomiques, mais étant donné que ces concepts ont une application limitée, ils ont une nature relative au lieu de la nature absolue des "a priori" kantienne.

"L'emploi de ces concepts, y compris l'espace, le temps et la causalité, est en fait la condition pour observer des phénomènes atomiques, donc est *a priori* dans ce sens du terme. Ce que Kant n'avait pas prévu, c'est que ces concepts *a priori* pouvaient être les conditions de la science et, en même temps, n'avoir qu'une portée limitée d'applicabilité.(...) La physique moderne a changé le postulat de Kant sur la possibilité de jugements synthétiques *a priori* et l'a fait passer du rang du postulat métaphysique à celui de postulat pratique. Les jugements synthétiques *a priori* ont donc le caractère d'une vérité relative."²⁴⁹

"Même si nous nous rendons compte que la signification d'un concept n'est jamais définie avec une précision absolue, certains concepts font partie intégrante des méthodes scientifiques puisqu'ils représentent pour le moment le résultat final de l'évolution de la pensée humaine dans le passé, et même dans un passé très reculé; peut-être sont-ils même hérités et, de toute manière, ils sont les instruments indispensables à la recherche scientifique actuelle. Dans ce sens, ils peuvent être pratiquement *a priori*. Mais, dans l'avenir, il est possible que l'on découvre de nouvelles limitations à leur applicabilité."²⁵⁰

Nous voyons que pour Heisenberg les *a priori* de Kant peuvent être réinterprétés comme des *a priori* pratiques, à objectivité faible. Le seul argument que Heisenberg présente pour affirmer l'unicité du langage courant est que ce dernier est le produit de l'évolution du cerveau humain et que de cette façon il a devenu une partie intégrante de l'esprit humain. Heisenberg accepte l'idée que dans l'avenir on pourrait trouver des nouvelles

²⁴⁸ Réf. (246), p. 52-53 (Souligné par Heisenberg lui-même)

²⁴⁹ Réf. (246), p. 103- 104 (Souligné par Heisenberg lui-même)

²⁵⁰ Réf. (246) p. 106- 107 (Souligné par Heisenberg lui-même)

limitations aux concepts du langage courant mais il écarte la possibilité de découvrir des concepts radicalement nouveaux. L'argument de Heisenberg n'est pas très convaincant puisqu'on peut soutenir qu'il n'y pas de raison de considérer que l'évolution de la pensée humaine dont les concepts du langage que nous possédons au présent sont le résultat - soit déjà terminée. On peut envisager la possibilité de créer des concepts radicalement nouveaux qui seront eux-mêmes le résultat de l'évolution continue de la pensée humaine et qui permettront de rendre compte des régularités quantiques d'une façon réaliste et cohérente.

7.1.1. La limitation du langage dans la physique quantique.

Pour Heisenberg ces limitations de l'usage du langage sont montrées dans la physique quantique par les relations d'incertitude:

"(...) l'application de ces concepts est limitée par les relations d'incertitude et, quand nous utilisons ces concepts classiques, nous ne devons jamais perdre de vue leur portée limitée, sans pour cela pouvoir ou devoir essayer de les améliorer."²⁵¹

7.1.2. Comment arriver à la non-ambiguïté.

Selon Heisenberg nos concepts ne sont pas définis avec précision par rapport à leur sens, néanmoins, ils peuvent être définis avec précision par rapport à leurs connexions, quand ils deviennent partie d'un système d'axiomes et de définitions qui peuvent s'exprimer de manière cohérente par un schème mathématique. Un tel système est appelé par Heisenberg un système fermé.

"Tous les concepts et mots formés dans le passé (...) ne sont pas vraiment nettement définis quant à leur signification; c'est-à-dire que nous ne savons pas exactement jusqu'à quel point ils nous aideront à découvrir notre explication du Monde. (...) Cependant, ces concepts peuvent être nettement définis quant à leurs liens. Cela est effectivement le cas quand les concepts deviennent partie intégrante d'un système d'axiomes et de définitions que l'on peut exprimer de façon cohérente par un ensemble mathématique."²⁵²

Parmi les systèmes appelés par Heisenberg fermés on trouve, selon lui, la mécanique classique et la mécanique quantique, la première constituant un "à priori" pour la description des expériences en physique quantique.

Pour Heisenberg c'est au moyen des mathématiques que nous arrivons à la non-ambiguïté du langage, indispensable pour exercer la science

"(...) la science est forcément basée sur le langage comme seul moyen d'expression; dans les cas où le problème de l'absence de toute ambiguïté a une importance extrême, les modes logiques doivent jouer leur rôle. (...) en science expérimentale, les concepts des lois générales doivent être définis avec une précision complète, et cela ne peut se faire qu'à l'aide

²⁵¹ Réf. (246) p. 35

²⁵² Réf. (246) p.105 – 106

d'abstractions mathématiques."²⁵³

Nous trouvons ici une différence entre Bohr et Heisenberg. Nous avons dit que l'unicité du langage courant et l'impossibilité de ce dernier à rendre compte des régularités quantiques est pour Bohr le paradoxe fondamentale de la mécanique quantique. Il conclut que l'on doit accepter l'existence de \hbar et l'indivisibilité que \hbar confère aux phénomènes quantiques comme des faits sans explication possible.

Pour échapper au paradoxe quantique Bohr crée le mode complémentaire de description, et selon notre analyse fait au chapitre 4, propose une prescription stricte pour définir le sens des concepts du langage courant, prescription qui consiste à dire que le sens d'un concept ne peut être défini qu'au moyen d'une expérience concrète (Nous avons souligné la base linguistique de cette prescription instrumentaliste).

Heisenberg ne parle pas d'indivisibilité. Cette notion ne joue pas de rôle dans sa pensée. Pour lui le sens des concepts est mal défini. Ce qui peut être bien défini est le rapport, le lien entre les concepts, et cela au moyen des mathématiques.

La complémentarité n'est pour Heisenberg qu'un moyen utile mais ambigu de parler:

"(...) l'on peut dire que le concept de complémentarité introduit par Bohr dans l'interprétation de la théorie quantique a encouragé les physiciens à utiliser un langage ambigu plutôt que non ambigu, à utiliser les concepts d'une manière plutôt vague en conformité avec le principe d'incertitude, à appliquer alternativement différents concepts classiques qui mèneraient à des contradictions si on les utilisait simultanément. C'est ainsi qu'on parle d'orbites électroniques, d'ondes corpusculaires et de densité de charge, d'énergie et de quantité de mouvement, etc., sans jamais perdre conscience du fait que le domaine où peuvent s'appliquer ces concepts est très limité. Quand cet emploi vague et non systématique du langage mène à des difficultés, le physicien est forcé de se rabattre sur le schéma mathématique et sur sa corrélation sans ambiguïté avec les faits expérimentaux."²⁵⁴

7.2. LA "POTENTIA". LES TENTATIVES ONTOLOGIQUES DE HEISENBERG

7.2.1. La notion de "potentia" chez Heisenberg.

Heisenberg, à différence de Bohr, n'écarte pas la possibilité de trouver une ontologie qui puisse s'adapter aux phénomènes quantiques. Pour cela il introduit la notion de *potentialité*. Pour lui la fonction d'onde n'est pas seulement un symbole utile pour calculer, elle représente un aspect de la réalité objective au sens fort.

"La fonction de probabilité combine des éléments objectifs et des éléments subjectifs: elle contient des énoncés sur les possibilités ou sur les tendances les plus probables (*potentia*, dans la philosophie d'Aristote), et ces énoncés sont complètement objectifs et ne dépendent aucunement de l'observateur; et elle contient des énoncés concernant ce que nous connaissons du système, lesquels

²⁵³ Réf. (246) p.227

²⁵⁴ Réf. (246) p. 238

sont naturellement subjectifs dans la mesure où ils peuvent différer d'un observateur à un autre. Dans les cas idéaux, l'élément subjectif de la fonction de probabilité peut être pratiquement négligeable comparé à l'élément objectif; le physicien déclare alors qu'il s'agit d'un 'cas pur'.²⁵⁵

"Mais il faut souligner que la fonction de probabilité ne représente pas en elle-même le déroulement du phénomène dans le temps: elle représente une tendance des phénomènes et de notre connaissance de ces phénomènes. La fonction de probabilité ne peut être reliée à la réalité que si une condition essentielle est remplie, à savoir si une nouvelle mesure est faite pour déterminer une certaine propriété du système."²⁵⁶

Heisenberg décrit le processus d'une mesure quantique en trois stades distincts:

"(...) 1. traduire la situation expérimentale initiale en une fonction de probabilité; 2. suivre l'évolution de cette fonction avec le temps; 3. énoncer quelle est la nouvelle mesure du système que l'on va faire et dont on peut alors calculer le résultat à partir de la fonction de probabilité. (...) Le deuxième stade ne peut se décrire à l'aide des concepts classiques; il n'existe aucune description de ce que devient le système dans l'intervalle entre l'observation initiale et la mesure suivante. Ce n'est que dans le troisième stade que nous passons de nouveau du 'possible' au 'réel'.²⁵⁷

Il faut souligner que Heisenberg emploie le mot "réel" pour se référer aux choses qui se déroulent dans l'espace-temps. En effet, en faisant une critique des idées de Bohm et en particulier de la considération de la fonction d'onde comme "réel", Heisenberg dit:

"Que veut dire attribuer le nom de 'réelles' aux ondes dans un espace de configuration? Cet espace est un espace fortement abstrait; le mot 'réel' vient du mot latin *res* qui signifie 'chose'; mais les choses existent dans l'espace ordinaire à trois dimensions et elles n'existent pas dans un espace de configuration abstrait. L'on peut donner aux ondes de cet espace le nom 'd'objectives' quand on désire dire que ces ondes ne dépendent pas de l'observateur, mais on ne peut guère les traiter de 'réelles', à moins d'être prêt à changer la signification du mot."²⁵⁸

Nous ne devons donc pas interpréter les multiples allusions de Heisenberg à la "réalité" des objets macroscopiques comme une indication de qu'il était un macro-objectiviste. Pour lui la réalité des objets macroscopiques est une réalité faible.

En effet, dans un des exemples qu'il présente pour illustrer son principe d'incertitude Heisenberg analyse la mesure de la position d'un électron au moyen d'un microscope. Il arrive à la conclusion de que dans le cas où nous rendons mobile le microscope pour déterminer l'échange d'impulsion entre l'électron et les photons, nous ne trouverons pas une violation des relations d'incertitude car nous devons considérer ces relations pour le microscope même.

²⁵⁵ Réf. (246). p.48 (Souligné par Heisenberg lui-même)

²⁵⁶ Réf (246) p.38

²⁵⁷ Réf (246) p.38-39

²⁵⁸ Réf. (246) p. 166-167 (Souligné par Heisenberg lui-même)

Heisenberg considère trois sortes de réalisme:

"(...) nous 'objectivons' un postulat si nous proclamons que son contenu ne dépend pas des conditions dans lesquelles il peut être vérifié. Le réalisme pratique suppose qu'il y a des postulats qui peuvent être rendus objectifs et qu'en fait la plus grande partie de notre expérience de la vie quotidienne consiste en postulats de ce genre. Le réalisme dogmatique, lui, proclame qu'il n'existe pas de postulat concernant le Monde matériel qui ne puisse être rendu objectif. Le réalisme pratique a toujours été et sera toujours une partie essentielle des sciences expérimentales. (...) la position prise par la physique classique est une position de réalisme dogmatique. (...) Mais la théorie quantique est en elle-même un exemple de la possibilité d'expliquer la Nature au moyen de lois mathématiques simples, sans se servir du réalisme dogmatique. (...) Les sciences de la Nature sont en fait possibles sans partir du réalisme dogmatique.

Le réalisme métaphysique va plus loin que le réalisme dogmatique et déclare que 'les choses existent réellement'. (...) L'affirmation que les choses existent réellement diffère du postulat du réalisme dogmatique dans la mesure où, ici, on emploie le mot 'Existe', (...) Mais il est difficile de voir ce qu'on veut dire par là qui ne soit déjà contenu dans la thèse du réalisme dogmatique."²⁵⁹

Si nous prenons en compte le fait que Heisenberg n'était pas un macro-objectiviste nous pouvons conclure que le "réalisme pratique" n'a pas un contenu ontologique. Les assertions qui peuvent être rendues objectives dans le réalisme pratique ne le sont pas au sens fort. Même le réalisme dogmatique n'est pas identifié par Heisenberg avec l'affirmation de ce que "les choses existent réellement", affirmation qui est fondée sur l'objectivité forte, bien qu'il semble finalement les identifier.

D'autre part, ainsi que le souligne d'Espagnat²⁶⁰, Heisenberg érige la *vérification* - la vérification que nous faisons- en concept auquel ceux d'objectivité et de réalité doivent être en définitive "subordonnés".

Quand Heisenberg affirme que le réalisme pratique est une partie essentielle de la science naturelle il se réfère donc au langage que nous devons employer comme une condition nécessaire pour faire de la science. Ce langage est celui de la physique classique qui est dans la "pratique" un langage "réaliste".

7.2.2. Passage du "potentiel" au "réel"

Qui se passe au moment d'une mesure?

"(...) l'interprétation théorique d'une expérience commence par les deux stades que nous avons discutés. Dans le premier stade, il nous faut décrire les conditions de l'expérience finalement combinées avec une première observation, et cela en termes de physique classique; puis traduire cette description en fonction de probabilité. Celle-ci suit les lois de la mécanique quantique et son évolution avec le temps - qui est continue - peut se calculer à partir des conditions initiales: c'est là le deuxième stade (...) Quand nous passons à l'observation suivante (dont le résultat devrait se prévoir d'après la théorie), il est très important de se rendre

²⁵⁹ Réf. (246) p. 91, 92, 93.

²⁶⁰ d'Espagnat, B. *Une Incertaine Réalité* - (Gauthier - Villards Paris. 1.985) p.201

compte que notre objet a forcément été en contact avec les autres parties du monde, à savoir les conditions expérimentales, l'appareil de mesure, etc., avant l'observation et, au minimum, pendant l'observation. Cela signifie que l'équation du mouvement pour la fonction de probabilité contient maintenant l'influence de l'interaction avec le dispositif de mesure. Cette influence introduit un nouvel élément d'incertitude, puisque le dispositif de mesure est forcément décrit en termes de physique classique et qu'une telle description comporte toutes les incertitudes concernant la structure microscopique du dispositif que nous connaissons par la thermodynamique; et puisque le dispositif est en relation avec le reste du monde, il contient en fait les incertitudes sur la structure microscopique du monde entier. On peut dire que ces incertitudes sont objectives dans la mesure où elles ne sont qu'une conséquence de la description à l'aide de la physique classique et ne dépendent aucunement de l'observateur; et on peut dire qu'elles sont subjectives dans la mesure où elles se réfèrent à notre connaissance incomplète de ce monde.

Une fois que cette interaction a eu lieu, la fonction de probabilité contient l'élément objectif de tendance et l'élément subjectif de connaissance incomplète, même s'il s'était agi avant d'un 'cas pur'.²⁶¹

En se référant à la signification en mécanique statistique classique de l'appartenance d'un système à un ensemble statistique, Heisenberg écrit:

(...) en physique classique, cette appartenance signifie, comme nous l'avons dit, des postulats non seulement sur le système mais aussi sur le degré de connaissance qu'a l'observateur du système. L'on doit faire une exception à cette affirmation en théorie quantique: si l'ensemble n'y est caractérisé que par une seule fonction d'onde dans l'espace de configuration (et non, comme d'habitude, par une matrice statistique), nous nous trouvons devant une situation spéciale (dite 'cas pur') dans laquelle on peut traiter la description d'objective en un certain sens et dans laquelle l'élément de connaissance incomplète ne se présente pas immédiatement. Mais étant donné que chaque mesure (vu ses caractéristiques irréversibles) réintroduirait l'élément de connaissance incomplète, la situation ne serait pas fondamentalement différente.²⁶²

Dans les citations précédentes se trouve implicite ce que nous pouvons appeler la théorie de la mesure de Heisenberg. Rappelons brièvement le problème de la mesure étudié au chapitre 4. On mesure une variable A appartenant à un système S au moyen d'un instrument M . La mesure est indiquée par la position d'une aiguille sur un cadran de M . Si l'état initial de S est une superposition d'états propres de A l'évolution III (voir chapitre 4) prédit que l'état final du système total ($S + M$) sera un cas pur, tandis que l'évolution VI (voir chapitre 4) prédit qu'il sera un mélange propre. Etant donné que l'évolution VI n'est pas un cas particulier de l'évolution III et qu'il est possible en principe de distinguer expérimentalement un mélange propre de systèmes S d'un mélange impropre de tels systèmes, nous ne pouvons pas conclure que les principes I à VI de la mécanique quantique (voir chapitre 4) peuvent déboucher sur une interprétation réaliste.

Le résultat de l'évolution III semble en plus indiquer qu'après l'interaction l'appareil M

²⁶¹ Réf. (246) p. 47-49

²⁶² Réf. (246) p. 178-179

est simultanément dans une superposition d'états correspondant chacun à différentes valeurs des positions de la pointe de l'aiguille sur le cadran. Cette conclusion est en conflit avec les concepts du sens commun sur les corps macroscopiques.

La théorie de la mesure implicite dans les citations précédentes est très vague. Si l'on tente de la préciser de la manière que Heisenberg semble suggérer on aboutit à quelque chose d'insoutenable²⁶³. La théorie, en effet, peut se formuler de la manière suivante:

A. L'instrument M n'est pas un cas pur. Nous ne pouvons pas lui assigner un vecteur d'état car il existe des incertitudes qui proviennent de notre faute de connaissance de son structure atomique et du fait que M est en contact avec le reste du monde dont nous ignorons l'état microscopique. Nous devons donc assigner un mélange propre à l'instrument M . Avant l'interaction entre M et le système S nous avons un mélange propre pour le système total $M + S$.

B. Après l'interaction nous avons également un mélange propre pour le système total. Ce mélange doit être équivalent à un mélange où chaque système de l'ensemble des systèmes ($M + S$) qui le composent correspond, avec une probabilité donnée, à un vecteur dans lequel l'aiguille de M a une position définie.

Nous esquisserons maintenant les arguments pour soutenir que la théorie de la mesure implicite chez Heisenberg précisée de la manière qu'il semble suggérer n'est pas soutenable²⁶⁴.

Soient les états de M et de S $|\psi^\rho\rangle$ et $|\phi^\nu\rangle$ respectivement.

Initialement M est un mélange propre d'états $|\psi^\rho\rangle$ avec probabilité P_ρ et S est dans une superposition d'états $|\phi^\nu\rangle$ égale à $\sum_\nu a_\nu |\phi^\nu\rangle$. L'état initial du système total est donc un mélange d'états $|\psi^\rho\rangle \sum_\nu a_\nu |\phi^\nu\rangle$ avec probabilité P_ρ .

L'état final du système total est le mélange propre d'états $\sum_\nu a_\nu |\psi^{\rho\nu}\rangle |\phi^\nu\rangle \equiv |\Phi^\rho\rangle$ avec probabilité P_ρ . Les $|\psi^{\rho\nu}\rangle$ correspondent à la même position ν de l'aiguille de M et indiquent le même état $|\phi^\nu\rangle$ de S . Appelons A ce mélange.

L'état de M le plus général qui correspond à la position ν de l'aiguille de M est une combinaison linéaire de $|\psi^{\rho\nu}\rangle$: $\sum_\rho C_\rho^{\nu k} |\psi^{\rho\nu}\rangle$ ou k indique la combinaison linéaire k .

En conséquence l'état le plus général du système total où le vecteur d'état de M correspond à une position définie de l'aiguille est :

$$|\Psi^{\nu k}\rangle \equiv \left[\sum_\rho C_\rho^{\nu k} |\psi^{\rho\nu}\rangle \right] |\phi^\nu\rangle$$

²⁶³ Shimony, A. "Réflexions sur la philosophie de Bohr, Heisenberg et Schrödinger" **Journal de Physique** Colloque 62, supplément au No.3, Tome 42, Mars 1981, p.C2-91 - C2-95

²⁶⁴ Voir par exemple, Wigner, E. The problem of the Measurement **Am. J. of Phys.** **31** . 1.963. 6-15

Selon la théorie implicite chez Heisenberg le mélange A doit être équivalent à un mélange B de systèmes $|\Psi^{vk}\rangle$ avec probabilité P_{vk} où $\sum_k P_{vk} = |a_v|^2$

Il peut être prouvé que le mélange A n'est pas équivalent au mélange B .

En plus de l'insoutenabilité de la théorie de la mesure de Heisenberg -toujours précisée de la manière qu'il semble suggérer- il se trouve une ambiguïté dans sa description du passage du potentiel au réel.

"L'observation elle-même change de façon discontinue la fonction de probabilité; elle choisit entre tous les phénomènes possibles celui qui a eu lieu en fait. Etant donné que, par l'observation, notre connaissance du système a changé de façon discontinue, sa représentation mathématique a également subi un changement discontinu, et nous parlons de saut 'quantique'. Quand on utilise le vieil adage 'Natura non facit saltus' (la Nature ne fait pas de sauts) comme point de départ pour critiquer la théorie quantique, nous pouvons répliquer que notre connaissance peut certes changer de façon soudaine et que ce fait justifie le terme 'saut quantique'.

Par conséquent, la transition du 'possible' au 'réel' a lieu pendant l'acte d'observer. Si nous voulons décrire ce qui se passe au cours d'un phénomène atomique, il faut que nous nous rendions compte que le terme 'se passe' ne s'applique qu'à l'observation et non à l'état de choses entre deux observations; il s'applique à l'acte physique d'observer et non à l'acte psychologique et nous pouvons dire que la transition du 'possible' au 'réel' se produit dès que l'interaction de l'objet avec la jauge de mesure (donc avec le reste du monde) est entrée en jeu; le terme 'se passe' n'a aucun lien avec l'acte d'enregistrement du résultat par le cerveau de l'observateur. Mais le changement discontinu de la fonction de probabilité se produit en même temps que l'acte d'enregistrer, car c'est le changement discontinu de notre connaissance au moment de l'enregistrement qui a son reflet dans le changement discontinu de la fonction de probabilité."²⁶⁵

Dans les paragraphes précédents Heisenberg distingue :

A. L'interaction de l'objet avec l'instrument de mesure, ce qu'il appelle l'acte physique d'observer ou simplement *l'acte d'observer*, et

B. L'enregistrement du résultat par le cerveau de l'observateur, ce qu'il appelle l'acte psychologique d'observer ou simplement *l'acte d'enregistrer*.

La transition du "possible" au "réel" a lieu pendant l'acte d'observer, mais le changement discontinu de la fonction d'onde se produit en même temps que *l'acte d'enregistrer*. Pour Heisenberg ce qui change de façon discontinu est notre connaissance.

Dans ses réponses aux critiques faites par Janossy à l'interprétation de Copenhague Heisenberg écrit:

"Son point d'attaque (celui de Janossy) est ce que l'on nomme 'la réduction des

²⁶⁵ Réf. (246) p. 50-51

paquets d'ondes', c'est-à-dire le fait que la fonction d'onde (ou, plus généralement, la fonction de probabilité) change de façon discontinue quand l'observateur prend connaissance du résultat d'une mesure. Janossy remarque que cette réduction ne peut se déduire des équations différentielles du formalisme mathématique et il croit pouvoir en tirer qu'il existe une incohérence dans l'interprétation habituelle. Il est bien connu que la 'réduction des paquets d'ondes' apparaît toujours dans l'interprétation de Copenhague au moment où l'on passe du possible au réel. La fonction de probabilité, laquelle couvrait une vaste gamme de possibilités, se réduit soudain à une gamme bien plus étroite par le fait que l'expérience a conduit à un résultat spécifique et qu'un certain phénomène s'est effectivement produit. Dans le formalisme, cette réduction demande que ce qu'on appelle l'interférence des probabilités, phénomène le plus caractéristique de la théorie quantique, soit détruite par les interactions (partiellement indéfinissables et irréversibles) du système avec l'appareil de mesure et le reste du Monde."²⁶⁶

Dans la première partie de la citation Heisenberg affirme que "la réduction des paquets d'ondes" a lieu pendant *l'acte d'enregistrer*. Cependant il affirme un peu plus après que "la réduction" apparaît au moment où l'on passe du possible au réel, c'est-à-dire pendant *l'acte d'observer*.

Il y a donc chez Heisenberg une ambiguïté en ce qui concerne "la réduction des paquets d'ondes".

7.4. HEISENBERG ET BOHR

Heisenberg et Bohr coïncident dans la thèse de l'unicité du langage courant et aucun d'entre eux ne présente des arguments convaincants pour défendre la thèse.

Il existe, cependant, des différences entre Heisenberg et Bohr en ce qui concerne la manière d'arriver à la non-ambiguïté du langage, indispensable pour faire de la science.

Selon Bohr le moyen d'exprimer sans ambiguïté l'évidence quantique est l'emploi du mode complémentaire de description. Heisenberg, par contre, considère la complémentarité comme un instrument très utile et dans un certains sens satisfaisant mais à la fin ambigu. Pour lui la précision indispensable du langage s'obtient au moyen du raffinement qu'y apportent les mathématiques. Les concepts ne sont pas définis sans ambiguïté par rapport à leur sens, mais ils peuvent être rendus non-ambigus par rapport à leurs connexions, et cela s'obtient quand ils sont partie d'un système fermé d'axiomes, de définitions et de connexions exprimées les premiers par des symboles mathématiques et les dernières par des équations mathématiques.

Une autre différence très importante entre Heisenberg et Bohr est que chez Heisenberg nous ne trouvons pas l'intuition géniale de Bohr sur l'indivisibilité. Il n'y a pas de place dans les idées de Heisenberg pour des notions telles qu'"intérieur" d'un phénomène et "frontière" mouvante entre l'instrument et l'"intérieur."

L'idée de la "frontière" mouvante permet à Bohr de soutenir qu'aucune ontologie n'a pas de place dans un phénomène quantique. Heisenberg, au contraire, n'a pas d'arguments pour se refuser à chercher une ontologie car la notion d'indivisibilité ne joue pas de rôle

²⁶⁶ Réf. (246) p. 183 –184

dans sa pensée. En conséquence Heisenberg n'écarte pas la possibilité de trouver une ontologie qui peut s'adapter à l'évidence quantique. Il propose une sorte de réalité potentielle qui serait décrite par le vecteur d'état. Cependant ses tentatives pour rendre cohérente son idée ne sont pas satisfaisantes. Il y a des ambiguïtés dans sa description de la "réduction des paquets d'ondes" et sa théorie pour expliquer le passage du potentiel au réel n'est pas soutenable. Il semble que, les arguments que Bohr présente pour se refuser tout à fait à chercher une ontologie n'existant pas dans sa thèse, Heisenberg ait tenté d'en esquisser une, mais sans que sa tentative eût vraiment joué un rôle déterminant dans sa recherche comme fut le cas, par exemple d'Einstein.

7.5. Y-À-T-IL UNE INTERPRÉTATION DE COPENHAGUE?

Compte tenu des différences entre Bohr et Heisenberg peut-on dire qu'il existe une interprétation de Copenhague?

Nous venons d'identifier les différences qui existent entre les thèses de Bohr et Heisenberg. Il a été mentionné au début du chapitre que Bohr et Heisenberg sont considérés comme les fondateurs de l'interprétation "orthodoxe" de la mécanique quantique, interprétation qui est connue par le nom d'interprétation de Copenhague.

Compte tenu des différences que l'on trouve entre les deux fondateurs de la soi-disant interprétation il est raisonnable de dire que si elle existe elle ne peut être que l'intersection entre les thèses de Bohr et Heisenberg.

Cette intersection est composée des points suivants :

- i. L'unicité du langage courant.
- ii. L'inadéquation du langage courant pour décrire les régularités quantiques comme produites par des choses qui se déroulent dans l'espace-temps.
- iii. Le refus du macro-objectivisme.

Or, on attend d'une interprétation du formalisme quantique des réponses non ambiguës à des questions comme les suivantes:

A. Comment arrive-t-on à la non-ambiguïté?

B. Y-a-t-il, oui ou non, une ontologie liée à la description des phénomènes quantiques? Si oui, laquelle? Si non, quelles sont les raisons pour cette situation?

Nous connaissons déjà les réponses que Bohr et Heisenberg ont donné à ces questions et il n'y a pas besoin de les rappeler. Le point important ici est que notre analyse nous conduit à la conclusion de que strictement il n'existe pas une interprétation de Copenhague, c'est-à-dire que l'intersection des thèses de Heisenberg et Bohr ne constitue pas vraiment une interprétation du formalisme quantique.

Une conséquence immédiate de la conclusion précédente est que les phrases qui font allusion à l'"interprétation de Copenhague", n'ayant pas de référent, doivent être considérées comme dénués de sens.

Notre intention n'étant pas de faire de critiques mais plutôt d'apporter quelque chose de positif qui puisse servir à l'approfondissement de la compréhension des grandes leçons données par la physique quantique, nous dirons seulement que la plupart des interprétations du formalisme quantique trouvées dans la littérature avec le nom d'interprétation de Copenhague présentées soit avec l'intention d'éclairer les paradoxes quantiques, soit dans un esprit critique quelque fois démolisseur - sont composées les unes par certaines des thèses de Bohr arrangées dans un tout plus ou moins cohérent et les autres par un mélange des thèses de Bohr et Heisenberg dans lequel il est difficile parfois de trouver une cohérence manifeste.

Au lieu d'ajouter à la confusion générale, en parlant d'une inexistante "interprétation de Copenhague", nous proposons que l'on parle soit de l'"interprétation de Bohr" soit de l'"interprétation de Heisenberg" quand on veut se référer aux "interprétations orthodoxes" de la mécanique quantique.

Etudions maintenant la situation que l'on trouve à propos de l'interprétation du formalisme quantique dans les traités de mécanique quantique actuellement en vogue car cela peut nous illustrer sur les opinions des physiciens d'aujourd'hui sur l'affaire en question.

7.6. LES TRAITES DE MECANIQUE QUANTIQUE ET L'INTERPRETATION DU FORMALISME.

Nous pouvons nous forger une idée de la manière comment l'interprétation du formalisme quantique est présentée dans les manuels en examinant deux ouvrages qui adoptent à ce sujet des positions opposées, il s'agit des textes de Feynman²⁶⁷ et de Messiah²⁶⁸.

Dans son traité Feynman analyse très clairement les paradoxes que nous trouvons quand nous tentons d'utiliser le langage classique pour décrire ce qui se passe dans un phénomène quantique. Il n'y a aucune mention de la complémentarité dans le manuel ni aucune référence explicite à la nécessité d'employer le langage classique pour décrire les expériences et leur résultats, et Feynman se limite à remarquer que nous devons faire une sorte d'"acrobatie conceptuelle" quand nous voulons appliquer ce langage dans le domaine quantique. Sa position est clairement exprimée dans un paragraphe écrit dans son dernier ouvrage de vulgarisation de l'Electrodynamique Quantique où Feynman affirme:

"(...) les physiciens ont joué avec des amplitudes pendant plus de cinquante ans maintenant, et ils ont devenu très à l'aise avec elles. Outre cela toutes les particules nouvelles et les phénomènes nouveaux que nous sommes capables d'observer s'ajustent parfaitement à tout ce qui peut être déduit du cadre des amplitudes(...) Il n'existe donc aucun *doute expérimental* sur ces amplitudes: vous pouvez avoir toutes les préoccupations philosophiques que vous voulez à propos du sens des amplitudes (dans le cas qu'elles aient un sens à la fin), mais étant donné que la physique est une science expérimentale et que le cadre est d'accord avec les expériences, l'affaire est suffisamment satisfaisante pour nous."²⁶⁹

²⁶⁷ Feynman, R.P.; Leighton, R.B.; Sands, M.; **The Feynman Lectures on Physics** (Addison - Wesley Publishing Company. Reading MA 1.963)

²⁶⁸ Messiah, A.; **Quantum Mechanics** Vol I.(John Wiley & Sons Inc. New York, London Sydney. 1.968)

²⁶⁹Feynman, R.P. **Q.E.D. The Strange Theory of the Light and Matter.** (Princeton University Press.

Il n'y a pas d'ambiguïté dans le message de Feynman: si le formalisme a une interprétation, cette éventuelle interprétation n'est pas l'affaire des physiciens. Pour ces derniers il doit être suffisant que le formalisme soit un outil adéquat et réussi pour calculer.

Le traité de Messiah est écrit d'un point de vue complètement différent à celui de Feynman. En effet, Messiah dit dans son manuel :

"Une théorie physique ne peut prétendre être complète si elle se borne à prédire ce qu'on observe lorsqu'on fait telle ou telle expérience. Au départ de toute entreprise scientifique on pose comme postulat fondamental que la nature possède une réalité objective, indépendante de nos perceptions sensorielles ou de nos moyens d'investigation; l'objet de la théorie physique est de faire un compte-rendu intelligible de cette réalité objective."²⁷⁰

L'affirmation précédente n'est pas seulement opposée à l'opinion de Feynman mais elle est aussi contraire à la thèse de Bohr selon laquelle il n'y a pas de place pour une ontologie dans la description des phénomènes quantiques. Dans le reste de son exposé de l'interprétation du formalisme Messiah parle de la nécessité de décrire tout phénomène dans le langage classique, de l'indivisibilité des phénomènes quantiques et de la complémentarité, et il le fait fondamentalement dans le sens des idées de Bohr. Si l'on exempte sa position ontologique explicitement réaliste nous pouvons affirmer que dans son exposé Messiah est fidèle à Bohr.

Néanmoins, étant donné que le refus d'une ontologie est une partie intégrante de la pensée de Bohr nous ne pouvons pas dire que l'interprétation du formalisme présentée par le manuel de Messiah soit vraiment celle de Bohr. Quant aux idées de Heisenberg il n'y a pas mention dans le traité en question.

Entre ces deux extrêmes, l'un d'un refus catégorique à chercher une interprétation du formalisme et l'autre d'une interprétation presque égale à celle de Bohr, nous pouvons ubiquer la plupart de manuels actuels. Une caractéristique presque constante que présentent ces manuels est le rôle prépondérant qu'ils assignent à la notion *d'état du système quantique*, état qui est représenté par la fonction d'onde. Si ce système est décrit par une fonction d'onde qui est un vecteur propre d'un opérateur qui représente une quantité physique, le langage employé dans les manuels pour parler de la quantité en question en tant que propriété du système quantique n'est pas différent de celui utilisé pour se référer aux propriétés d'un objet classique. Cette manière de parler peut donner facilement l'idée que l'objet quantique a des propriétés en soi et que la seule différence avec un objet classique est que ces propriétés ne peuvent toutes être définies simultanément avec précision.

D'ici à considérer la fonction d'onde comme objectivement forte il n'y a qu'un pas, mais ce pas implique se heurter aux problèmes rattachés à la mesure. Or, un physicien a le droit logique de considérer la fonction d'onde Ψ comme une description de la réalité en soi, mais pour être cohérent il doit se rendre conscient des problèmes que comporte telle supposition et il ne peut surtout faire la supposition en question en se proclamant au même temps fidèle aux "interprétations orthodoxes" de la mécanique

Princeton, New Jersey. 1.985) p.124 (souligné par Feynman lui-même).

²⁷⁰ Réf.(268) p.151 (Souligné par Messiah lui-même)

quantique.

En conclusion, avec des exceptions comme celle du traité de Messiah, il est difficile d'échapper à la conséquence de ce que la plupart des manuels non seulement ne présentent pas une interprétation du formalisme semblable à ceux de Bohr et Heisenberg, mais à la fin ils ne font qu'enseigner à utiliser le formalisme comme des règles de calcul extrêmement fructueuses.

Dans la mesure où l'on peut parler de l'interprétation du formalisme trouvée dans les traités de mécanique quantique il doit être dit qu'il s'agit d'une interprétation particulière à chaque traité. Il est utile donc d'introduire une autre distinction et parler des "interprétations des manuels."

CHAPITRE 8

COSMOGENESE NON-ONTOLOGIQUE, REEL VOILE, L'ORDRE IMPLICITE ET L'ORDRE EXPLICITE

Dans ce chapitre nous étudierons les thèses de Wheeler, d'Espagnat et Bohm. Wheeler prend les idées de Bohr comme fondement pour proposer une théorie qui permettrait de comprendre l'existence et l'origine de l'univers. Sa théorie est une cosmogénèse non-ontologique.

Nous verrons qu'il existe une ressemblance entre la thèse de Bohr de l'unicité du langage et la thèse linguistique implicite chez d'Espagnat, appelée pour nous l'impuissance du langage. Finalement il est montré que dans la théorie de Bohm se trouve un aspect de totalité qui, à différence de la totalité bohrienne, est conceptuellement analysable.

8.1. LA COSMOGENESE NON-ONTOLOGIQUE DE WHEELER. LE SENS ET LES PHENOMENES QUANTIQUES.

Wheeler présente le schéma d'une théorie qui permettrait de comprendre l'existence et l'origine de l'univers et il le fait en prenant comme fondement les thèses de Bohr.

Nous pouvons affirmer que Wheeler vise une "cosmogénèse", mais une cosmogénèse très spéciale puisque, comme nous le verrons dans notre discussion, il s'agit d'une cosmogénèse non-ontologique.

En effet, l'univers, son existence et son origine sont pour lui à objectivité faible. Selon la théorie que Wheeler tente de construire nous ne pouvons pas comprendre notre existence sans prendre en compte celle de l'univers et à l'inverse, nous ne pouvons pas comprendre l'existence de l'univers sans prendre en compte notre propre existence.

Le réfèrent ultime pour Wheeler est le sens. En ce qui concerne ce dernier mot Wheeler se rallie à la définition de Follesdal:

"Le sens est l'intersection de toutes les données dont peuvent disposer les personnes qui communiquent."²⁷¹

Wheeler dit:

"Nous proposons (...) que l'établissement du sens est le fondement à partir duquel tout, y compris la théorie quantique même, peut être expliqué."²⁷²

Il est important pour nous d'étudier d'abord le contexte dans lequel Follesdal introduit sa définition du mot sens.

Le concept du "sens" ou de "signification" (en Anglais "meaning") est un des plus importants dans la philosophie du langage. Nous pouvons nous forger une idée du rôle que joue cette

²⁷¹ Follesdal, D.; "Meaning and Expérience" dans S. Guttenplan, éd. **Mind and Language** (Clarendon Press, Oxford, 1975) p. 254

²⁷² Wheeler, J.A.; "Bits, Quanta, Meaning" dans **Caianiello Célébration Volume**, A. Giovannini, M. Marinaro, F. Mancini et A. Rimini, éd.

notion dans la théorie du langage en examinant d'une manière très sommaire les considérations qui amènent Follesdal à sa définition. Notre intention n'étant pas de faire une analyse des différentes théories concernant le sens et plus généralement le langage - ce qui nous éloignerait de notre sujet principal - mais plutôt de montrer de façon schématique en quoi consiste la notion du sens, nous nous limiterons à décrire les points essentiels de l'article de Follesdal²⁷³ dans lequel apparaît la définition dont il s'agit.

Follesdal affirme d'abord qu'il accepte le point de vue qu'il appelle de l'empirisme, selon lequel toutes les données dont nous disposons nous les obtenons à travers nos sens. A partir de ces données, dit Follesdal, nous choisissons une "théorie de la nature" ou une description du monde qui consiste en une structure d'affirmations en rapport les unes avec les autres, structure qui rend compte de toutes les données dont nous disposons. Cette théorie de la nature contient des phrases et des entités supposées par ces phrases et, selon Follesdal, nous avons des raisons pour croire que ces phrases sont vraies et que les entités qu'elles supposent existent. La théorie en question doit être la plus simple possible pour inclure toutes les données que nous possédons et les entités introduites doivent être uniquement celles que la théorie demande.

Ces dernières, qui peuvent être des objets et des classes physiques aussi bien que d'autres entités nécessaires pour rendre compte de toutes les données, constituent tout ce qui est dans le monde.

Après avoir rendu compte des données, nous nous heurtons, affirme Follesdal, au problème de la communication: nous devons communiquer les uns avec les autres et cette communication est en essence une "traduction" d'une théorie de la nature en une autre, en d'autres termes elle est une corrélation entre les descriptions du monde. Une communication entre deux personnes est, selon Follesdal, une corrélation entre deux théories concernant tout ce qui est. C'est dans cet aspect du langage constitué par la communication que la notion de sens joue son rôle. En effet, Follesdal affirme qu'étant donné qu'une corrélation quelconque ne constitue pas nécessairement une traduction, on doit se demander quelle sorte de condition doit être imposée sur une corrélation afin de pouvoir la considérer comme une traduction. Follesdal dit que le point de vue traditionnel est que les expressions mises en rapport entre elles doivent exprimer le même sens.

Il est nécessaire, affirme Follesdal, d'identifier dans chaque phrase de notre théorie une composante particulière: le sens, lequel peut être mis en rapport avec le sens des phrases de la théorie de la personne avec qui nous communiquons.

Pour Follesdal une théorie du sens doit être fondée sur l'expérience sensorielle. Il considère qu'étant donné que le langage est un phénomène social, la base d'une théorie du sens, et en général d'une théorie du langage, ne doit pas se fonder sur les phénomènes physiologiques de la stimulation sensorielle de chaque personne. Ce qui se passe à l'intérieur des surfaces sensorielles, dans les terminaux nerveux, dans les nerfs et dans le cerveau n'est pas, selon Follesdal, partie des données sur lesquelles la communication et le langage doivent reposer puisque tous ces phénomènes intérieurs sont plutôt le produit de l'ajustement individuel à l'environnement. Les données qui comptent pour Follesdal sont constituées par tout ce qui se passe en dehors de et sur la surface sensorielle, c'est-à-dire, qu'il s'agit de la radiation lumineuse, les sons, et ainsi de suite et de l'interaction de

²⁷³ Réf. (271)

tous ces facteurs sur la surface sensorielle.

Follesdal examine les différentes conditions qu'il pense être raisonnable d'imposer à une corrélation afin de pouvoir la considérer comme une traduction, et après des analyses que nous ne reproduirons pas ici, il arrive à sa notion du sens:

"Je pense que la notion de sens que nous cherchons, et qui est sous-jacente à la communication, est ceci que le sens est l'intersection de toutes les données dont peuvent disposer les personnes qui, dans leur vie journalière, veulent communiquer."²⁷⁴

Maintenant que nous avons étudié quel est le sens du mot "sens" nous pouvons revenir à Wheeler et ses idées.

Pour construire sa théorie Wheeler soutient qu'une différence doit être faite entre un phénomène quantique enregistré par une conscience et un phénomène quantique non-enregistré par une conscience puisque seulement le premier peut être utilisé pour construire le sens. En effet, un phénomène quantique non-enregistré par une conscience ne peut constituer une donnée pour aucune personne qui communique, c'est uniquement dans le cas où le phénomène est enregistré par une conscience qu'il peut contribuer à la construction du sens. Si cette dernière notion est la notion fondamentale à laquelle toutes les autres notions doivent être "subordonnées" il est évident que la caractéristique essentielle d'un phénomène est qu'il soit observé, "observé" voulant dire "observé" par une conscience. Pour cette raison Wheeler dit:

"Nul phénomène n'est un phénomène tant qu'il n'est pas un phénomène observé."²⁷⁵

Nous pouvons dire que, en essence, la thèse de Wheeler est que l'univers est nécessaire pour construire le sens et que à son tour l'univers doit sa définition et son existence à la recherche du sens faite par ceux qui communiquent - c'est-à-dire par nous tous. Dans les termes de Wheeler:

"(...) l'existence est le circuit fermé du sens."²⁷⁶

Une moitié du circuit va de la physique au sens et celle-ci est la moitié la plus évidente. La deuxième partie va du sens à la physique et constitue, selon Wheeler la moitié la plus étrange.

Dans la section qui va suivre nous décrirons le "circuit fermé de l'existence" de Wheeler et les arguments qu'il présente pour étayer ses idées. Nous ne ferons pas, cependant, une analyse critique des arguments de Wheeler car, et lui-même l'affirme, ce qu'il propose n'est qu'une "hypothèse de travail" à partir de laquelle on devrait construire une "physique du sens" qui, selon lui, permettra de comprendre les fondements mêmes des lois physiques. Cette démarche, constituera, il nous explique, la "Troisième Epoque" de la physique, la première étant l'époque de Kepler et Galilée, celle de la description du mouvement sans explication de ce dernier, et la deuxième l'époque de Newton, de Faraday et Maxwell, de Einstein, et de la Physique Quantique d'aujourd'hui, celle des lois qui expliquent le changement mais dans laquelle il n'y a pas d'explication pour les lois mêmes.

²⁷⁴ Réf. (271)

²⁷⁵ Réf. (272)

²⁷⁶ Réf. (272)

Nous voulons, en conséquence, montrer seulement la direction dans laquelle Wheeler considère que doit s'orienter cette nouvelle "physique du sens" qu'il propose.

8.2 LE CIRCUIT FERME DE L'EXISTENCE.

Selon la définition du sens acceptée par Wheeler, nous construisons le sens à partir de l'"évidence," des données que nous possédons et que nous partageons les uns avec les autres au moyen de la communication. Les données sont constituées par tout ce que nous voyons, nous écoutons, nous sentons, etc.; et tout cela, dit Wheeler, peut être ramené en principe à des phénomènes quantiques élémentaires. La physique est nécessaire pour avoir la lumière, le son et tous les moyens de communication, et elle permet aussi, selon Wheeler, d'avoir la biologie au moyen de laquelle existent les personnes qui communiquent. Et de la communication que font ceux-là s'obtient le sens. Dans les termes de Wheeler:

"La physique fournit le mécanisme pour construire le sens."²⁷⁷

"(...) le sens est l'enfant de la physique."²⁷⁸

Cette partie du circuit, laquelle va de la physique au sens, est la plus évidente.

8.2.1. *Du sens à la physique.*

C'est la partie du circuit fermé du sens la plus étrange selon Wheeler. Pour lui l'"exigence du sens" doit être considérée comme étant à l'origine des amplitudes et des phases de probabilité, et les phases doivent être considérées comme les entités qui définissent tous les champs physiques, toute la géométrie, tout l'espace-temps, et à la fin toutes les particules et toute la physique. La physique est pour lui:

"(...) l'enfant du sens."²⁷⁹

et

"(...) le sens fournit le mécanisme pour construire la physique."²⁸⁰

Le mécanisme au moyen duquel la physique peut être construite à partir de la recherche du sens est pour Wheeler le suivant:

La construction du sens est équivalente à la recherche de l'"évidence", c'est-à-dire à la recherche de données. A fin de trouver cette "évidence" ou ces données nous devons avoir, selon Wheeler, la liberté de poser des questions et la possibilité d'identifier les réponses obtenues. Pour lui la première condition est équivalente à la liberté d'examiner les différents aspects complémentaires d'un phénomène, et la deuxième condition consiste simplement en la "possibilité de distinguer " parmi les différents aspects d'une situation donnée.

²⁷⁷ Réf. (272)

²⁷⁸ Réf. (272)

²⁷⁹ Réf. (272)

²⁸⁰ Réf. (272)

8.2.2. La "possibilité de distinguer", et les amplitudes de probabilité

La "possibilité de distinguer" demande, selon Wheeler, que l'on utilise des amplitudes de probabilité. Wheeler s'appuie sur les analyses de Wootters qui arrive à la conclusion de ce que

"Les amplitudes de probabilité mesurent la possibilité de distinguer."²⁸¹

Pour illustrer et expliquer la conclusion précédente Wheeler présente ce problème: Supposons que nous avons un échantillon de membres d'une certaine tribu et que nous devons identifier entre deux tribus celle à laquelle appartiennent les membres de l'échantillon. Imaginons également que nous avons deux cas à considérer:

Cas i): Les deux tribus en question sont: la tribu des Thors caractérisée par le fait que 32.7% de ses membres ont les yeux gris et 67.3% ont les yeux bleus, et la tribu des Eddas dans laquelle 67.3% des membres ont les yeux gris et 32.7% les yeux bleus.

Cas ii) Les deux tribus sont: la tribu des Aeolians dont 20.7% des membres ont les yeux gris, 4.3% les yeux bleus et 75% les yeux bruns, et celle des Boreans dont 4.3% des membres ont les yeux gris, 20.7% les yeux bleu et 75% les yeux bruns.

Si nous choisissons un système de coordonnées dans lequel un axe correspond à la fréquence de personnes dans chaque tribu qui ont les yeux bleus, un autre axe correspond à la fréquence de personnes qui ont les yeux gris, et le troisième correspond à la fréquence de personnes à yeux bruns, et nous portons sur ce système d'axes les points représentatifs de chaque tribu nous trouverons que les points correspondants aux Aeolians et aux Boreans sont beaucoup plus voisins entre eux que ceux correspondants aux Thors et aux Eddas entre eux.

Wheeler dit que, à partir du fait que dans l'"espace de probabilité" précédent les Aeolians sont beaucoup plus voisins des Boreans que les Thors des Eddas, nous devons attendre à ce que pour avoir la même chance d'être corrects dans notre jugement concernant la tribu à laquelle appartiennent les membres de notre échantillon, nous avons besoin d'un échantillon plus grande dans le cas ii) que dans le cas i).

L'analyse statistique montre cependant, nous explique Wheeler, que dans les deux cas avec un échantillon de 16 personnes nous avons la même chance de 12 à 1 d'être corrects dans notre jugement, c'est-à-dire que la possibilité de distinguer entre les Aeolians et les Boreans est la même que celle de distinguer entre les Thors et les Eddas. Wheeler affirme que le fait précédent constitue une "anomalie statistique" et il ajoute que si au lieu de considérer des probabilités nous considérons des amplitudes des probabilités, c'est-à-dire des quantités dont le carré est la probabilité, nous ne trouverons pas cette anomalie. En effet, en choisissant des amplitudes de probabilité notre système d'axes ne correspondra pas aux fréquences mais aux racines carrées des fréquences. Wheeler affirme que le fait que dans ce nouveau "espace" les points correspondants aux Aeoliens et aux Boreans soient également voisins entre eux que ceux correspondants aux Thors et aux Eddas entre eux résout l'anomalie.

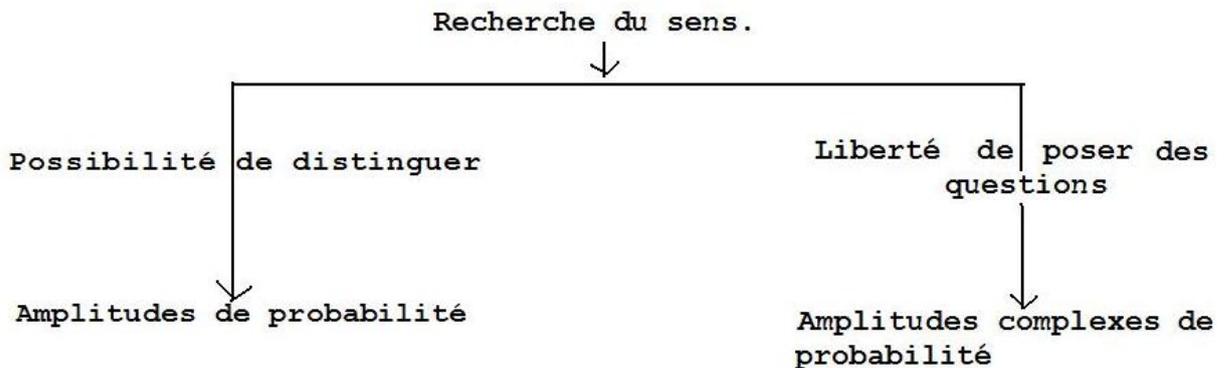
²⁸¹ Wootters, W.K. "The acquisition of information from quantum measurements" Ph. D. Dissertation, University of Texas at Austin, 1.980 cité par Wheeler dans Réf. (272)

Dans ce sens, conclut Wheeler, doit se comprendre l'affirmation de Wootters de ce que les amplitudes de probabilité mesurent la possibilité de distinguer.

8.2.3. La liberté de poser des questions et les amplitudes complexes de probabilité

Après être arrivé à la conclusion que la possibilité de distinguer implique la nécessité d'utiliser des amplitudes de probabilité Wheeler soutient que la liberté de poser des questions a pour conséquence que les amplitudes de probabilité doivent être de nombres complexes. Son argument est que quand nous étudions un système physique nous devons avoir la liberté de choisir entre les différents aspects complémentaires du système celui que nous voulons examiner. Wheeler accepte en conséquence la complémentarité comme une donnée de l'expérience et fait remarquer la relation profonde qui existe entre la complémentarité et le principe d'incertitude. Etant donné, il conclut, que pour dériver les relations de Heisenberg nous avons besoin des amplitudes complexes de probabilité, la liberté de poser des questions implique que les amplitudes de probabilité doivent être de nombres complexes.

L'argumentation de Wheeler jusqu'à ici nous pouvons la résumer ainsi :



Pour Wheeler l'exigence du sens est l'explication du fait que dans la théorie quantique l'état de la connaissance complète d'un système est représenté par une amplitude de probabilité qui est un nombre complexe.

8.2.4. De la phase aux champs et particules

Pour compléter cette partie du circuit laquelle va du sens à la physique il est nécessaire d'obtenir les champs et les particules à partir de la phase de l'amplitude de probabilité. Pour mieux comprendre la suggestion de Wheeler à ce sujet nous devons rappeler quelques résultats de la théorie de champs de Jauge. (Nous parlerons seulement des aspects classiques de ces théories).

Il est connu²⁸² que si nous multiplions une fonction d'onde Ψ_0 , dont l'évolution obéit à une équation comportant des dérivées $\partial/\partial x^\mu$, par un "facteur de phase non-intégrable" Φ

$$\Phi = e^{-\frac{ie}{\hbar c}\beta(x^\mu, \gamma)}$$

²⁸² Dirac, P.A.M.; "Quantised Singularities in the Electromagnetic Field" *Proc. Roy. Soc* 115, 1931, p.60-72. Voir aussi par exemple Sakuray, J.J.; **Advanced Quantum Mechanics** (Addison - Wesley Publishing Company, Reading, Massachusetts, 1973) p. 15-18

où e = charge de l'électron
 c = vitesse de la lumière
 $\hbar = h/2\pi$

γ = trajectoire de $-\infty$ à x^μ

$\beta(x^\mu, \gamma) = \int_{-\infty}^{x^\mu} k_\mu(x'^\mu) dx'^\mu$ est une fonction qui n'a pas une valeur définie dans chaque point x^μ (β dépend de la trajectoire), c'est-à-dire que $\partial k_\nu / \partial x^\mu \neq \partial k_\mu / \partial x^\nu$ (condition de non-intégrabilité)

nous obtenons une fonction d'onde

$$\Psi = e^{-\frac{ie}{\hbar c} \beta(x^\mu, \gamma)} \Psi_0$$

dont l'évolution obéit à une équation comportant la combinaison

$$\frac{\partial}{\partial x^\mu} - \frac{ie}{\hbar c} k_\mu$$

Cette équation est invariante sous l'effet de la transformation :

$$\begin{aligned} \Psi(x^\mu) &\rightarrow \Psi'(x^\mu) = e^{+\frac{ie}{\hbar c} \lambda(x^\mu)} \Psi(x^\mu) \\ k_\mu &\rightarrow k'_\mu = k_\mu + \frac{\partial \lambda}{\partial x^\mu} \end{aligned} \quad (8-1)$$

Si la particule décrite par $\Psi(x^\mu)$ est transportée autour d'un circuit fermé γ le changement de la phase de $\Psi(x^\mu)$ du à la présence de k_μ est :

$$e^{\frac{ie}{\hbar c} \oint_\gamma k_\mu dx^\mu}$$

Selon le théorème de Stokes :

$$e^{\frac{ie}{\hbar c} \oint_\gamma k_\mu dx^\mu} = e^{\frac{ie}{\hbar c} \iint_S \left(\frac{\partial k_\nu}{\partial x^\mu} - \frac{\partial k_\mu}{\partial x^\nu} \right) ds^{\mu\nu}}$$

Le champ $F_{\mu\nu} \equiv \partial k_\nu / \partial x^\mu - \partial k_\mu / \partial x^\nu$ est invariant sous l'effet de la transformation (8-1). De la définition de $F_{\mu\nu}$ on obtient :

$$\frac{\partial F_{\beta\gamma}}{\partial x^\alpha} + \frac{\partial F_{\gamma\alpha}}{\partial x^\beta} + \frac{\partial F_{\alpha\beta}}{\partial x^\gamma} = 0 \quad (8-2)$$

On identifie k_μ avec le potentiel électromagnétique A_μ et $F_{\mu\nu}$ avec l'intensité du champ électromagnétique. L'équation (8-2) représente deux équations de Maxwell. Nous pouvons obtenir les deux équations de Maxwell qui manquent au moyen d'un principe dynamique en construisant une densité lagrangienne adéquate.

8.2.4.1. L'effet Aharonov-Bohm

L'identification $k_\mu = A_\mu$ donne lieu à des effets observables²⁸³.

Considérons une expérience d'interférence d'électrons dans laquelle, en plus de la source S d'électrons, il y a un solénoïde s placé après le diaphragme D tel que l'illustre la figure

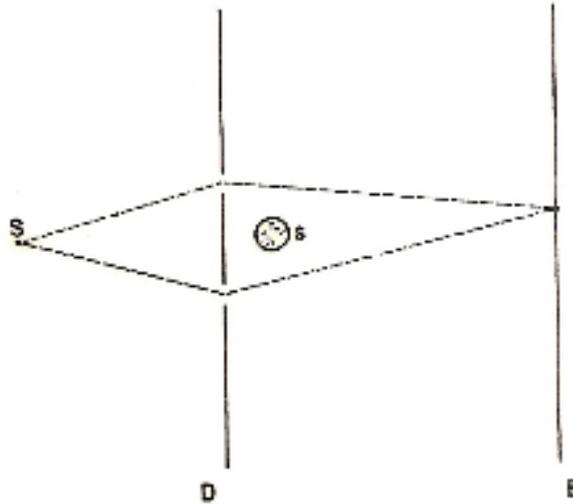


Figure — 8 — 1

Le diamètre du solénoïde est beaucoup plus petit que la distance entre les fentes et en conséquence la probabilité que les électrons passent à travers le solénoïde est négligeable. En dehors du solénoïde le champ magnétique est exactement zéro mais le potentiel magnétique est différent de zéro. Dans le cas où il n'y a pas de courant électrique dans le solénoïde nous obtenons sur l'écran E la configuration normale d'interférence. Si par contre il y a du courant dans le solénoïde la configuration d'interférence est changée. Cet effet s'explique par le fait que la figure d'interférence s'obtient comme conséquence de la différence de phase entre les ondes qui viennent de chaque fente du diaphragme et que cette différence de phase est, dans le deuxième cas, proportionnelle au flux du champ magnétique dans le solénoïde.

²⁸³ Aharonov, Y.; Bohm, D. **Phys. Rev** 115, 1959 p.484. Chambers, R. G.; **Phys. Rev. Letters** 5, 1960 p.3

8.2.4.2. Le facteur de phase non-intégrable: manifestation de A_μ

L'effet Aharonov - Bohm nous démontre que dans le cadre de la mécanique quantique $F_{\mu\nu}$ ne décrit pas tous les effets électromagnétiques. Il peut avoir des effets électromagnétiques sur un faisceau d'électrons dans une région où $F_{\mu\nu} = 0$ lesquels dépendent de l'intégrale:

$$\frac{e}{\hbar c} \oint A_\mu dx^\mu$$

D'autre part,

$$e \frac{ie}{\hbar c} \oint A_\mu dx^\mu = e \frac{ie}{\hbar c} \oint A_\mu dx^\mu + 2\pi N$$

Par conséquent, il n'est pas possible de distinguer expérimentalement les phases $e/\hbar c \oint A_\mu dx^\mu$ et $e/\hbar c \oint A_\mu dx^\mu + 2\pi N$. Il semble, en conséquence, que c'est le facteur de phase non-intégrable qui décrit de façon adéquate les effets électromagnétiques. Nous pouvons donc dire que A_μ se manifeste dans le facteur de phase ou que : *le facteur de phase non-intégrable autour d'un circuit fermé est une manifestation de l'existence de A_μ .*

8.2.4.3. L'électromagnétisme comme une théorie de Jauge

Il est connu²⁸⁴ que l'électromagnétisme peut être interprété comme une théorie de Jauge.

Considérons, en effet, une fonction d'onde $\Psi_0(x^\mu)$ dont l'évolution obéit à une équation comportant des dérivées $\partial/\partial x^\mu$. La équation est invariante par changement global (c'est-à-dire identique en tout point de l'espace-temps) de la phase de Ψ_0

$$\Psi_0 \rightarrow \Psi = e^{i\lambda} \Psi_0 \quad \text{où } \lambda = \text{constante}$$

Mais l'équation n'est pas invariante par changement local (c'est-à-dire dépendant du point de l'espace-temps) de la phase.

$$\Psi_0 \rightarrow \Psi = e^{+\frac{ie}{\hbar c} \lambda(x^\mu)} \Psi_0 \quad (8-3)$$

Il est possible de construire une équation invariante par changement local de la phase à condition d'ajouter au terme $\partial/\partial x^\mu$ un terme de couplage à un champ $A_\mu =$

²⁸⁴ Voir par exemple Moriyasu, K.; An elementary Primer for Gauge Theory (World Scientific Publishing Co. Pte. Ltd., Singapore, 1985) voir aussi Yang, C. N.; **Gauge Fields** Proceedings of the 1975 Hawaii Conférence (University Press of Hawaii)

$\partial\lambda/\partial x^\mu$:

$$\frac{\partial}{\partial x^\mu} \rightarrow \frac{\partial}{\partial x^\mu} - \frac{ie}{\hbar c} A_\mu$$

En considérant le changement de phase autour d'un circuit fermé on obtient au moyen du théorème de Stokes le champ

$$F_{\mu\nu} = \frac{\partial k_\nu}{\partial x^\mu} - \frac{\partial k_\mu}{\partial x^\nu}$$

On identifie A_μ avec le potentiel électromagnétique et $F_{\mu\nu}$ avec l'intensité du champ électromagnétique. C'est un principe d'invariance sous l'effet des transformations locales de phase qui implique ici l'existence du champ électromagnétique. Etant donné que la transformation locale de phase (8-3) est équivalente à la transformation de Jauge de l'électrodynamique:

$$A_\mu \rightarrow A'_\mu = A_\mu + \frac{\partial\lambda}{\partial x^\mu}$$

les transformations locales de phase sont appelées transformations de Jauge.

8.2.4.4. L'électromagnétisme comme manifestation d'un facteur de phase non-intégrable.

Nous avons dit que dans la mécanique quantique il semble que c'est le facteur de phase non-intégrable qui décrit de façon adéquate les effets électromagnétiques. Wu et Yang, en analysant le effet Aharonov-Bohm se demandent ce qui peut constituer une description complète et intrinsèque de l'électromagnétisme et considèrent que la base d'une telle description doit être le concept du facteur de phase non-intégrable. Ils concluent que:

*"L'électromagnétisme est (...) une manifestation (...) d'un facteur de phase non-intégrable"*²⁸⁵

Yang exprime l'idée d'une façon plus concise:

*"(...) l'électromagnétisme est un facteur de phase non-intégrable"*²⁸⁶

²⁸⁵ Wu, T.T.; Yang, C.N. "Concept of nonintegrable phase factors and global formulation of Gauge Fields" *Phys. Rev. D* Vol.12, No. 12, 1975 p.3845 - 3857 (Souligné par Wu et Yang eux-mêmes)

²⁸⁶ Yang, C. N. "Intégral formulation for Gauge Fields" *Phys. Rev. Lett* Vol 33, No.7, 1974, p.445-446 (Souligné par Yang lui-même)

Nous voyons que Wu et Yang inversent le raisonnement de la section (8.2.4.2.) où le facteur de phase est considéré comme une manifestation de l'électromagnétisme. Ils considèrent, par contre, l'électromagnétisme comme une manifestation d'un facteur de phase. Selon le raisonnement usuel l'électromagnétisme a la primauté sur le facteur de phase ou, dans d'autres termes, l'existence de l'électromagnétisme a la primauté sur l'existence du facteur de phase.

Selon le raisonnement de Wu et Yang c'est l'existence du facteur de phase qui a la primauté sur l'existence de l'électromagnétisme.

8.2.4.5. Les champs de Yang - Mills

La généralisation du raisonnement de l'invariance de Jauge à d'autres symétries sous-jacentes à d'autres interactions a été proposée par Yang et Mills²⁸⁷ à propos de l'interaction nucléaire forte. La symétrie la plus caractéristique de l'interaction nucléaire forte est l'indépendance de cette interaction par rapport à la charge électrique des hadrons. Cette propriété correspond à une invariance par une symétrie interne, la symétrie d'isospin. Selon cette symétrie le proton et le nucléon sont les deux composants d'un champ de nucléon.

En considérant une transformation locale dans l'espace interne d'isospin Wu et Yang introduisent un potentiel b_μ^k et une intensité du champ $f_{\mu\nu}^k$ analogues au potentiel A_μ et à l'intensité du champ $F_{\mu\nu}$ de électromagnétisme.

Nous avons dit que, selon Wu et Yang, l'électromagnétisme est une manifestation d'un facteur de phase non-intégrable. Peut-on dire dans le cas plus général considéré par Yang et Mills que le champ de Jauge est une manifestation d'un facteur de phase non-intégrable? Anandan²⁸⁸ montre au moyen d'un théorème mathématique que toute l'information invariante sous l'effet de la transformation locale de Jauge est contenue dans un facteur de phase non intégrable. En conclusion, nous pouvons affirmer, si nous admettons le raisonnement de Wu et Yang à propos de l'électromagnétisme, que, dans le cas d'un champ de Jauge général, *le champ de Jauge est une manifestation d'un facteur de phase non-intégrable.*

8.2.4.6. De la phase aux champs et particules

L'importance des théories de Jauge vient du fait qu'aujourd'hui il est considéré que tous les champs peuvent être générés au moyen d'un principe d'invariance de Jauge. Si nous acceptons l'inversion du raisonnement usuel et considérons les champs comme une manifestation d'un facteur de phase non-intégrable, nous pouvons comprendre la suggestion de Wheeler de considérer qu'aucun champ n'a d'existence ou de significations différentes à celles définies par les différences de phase.

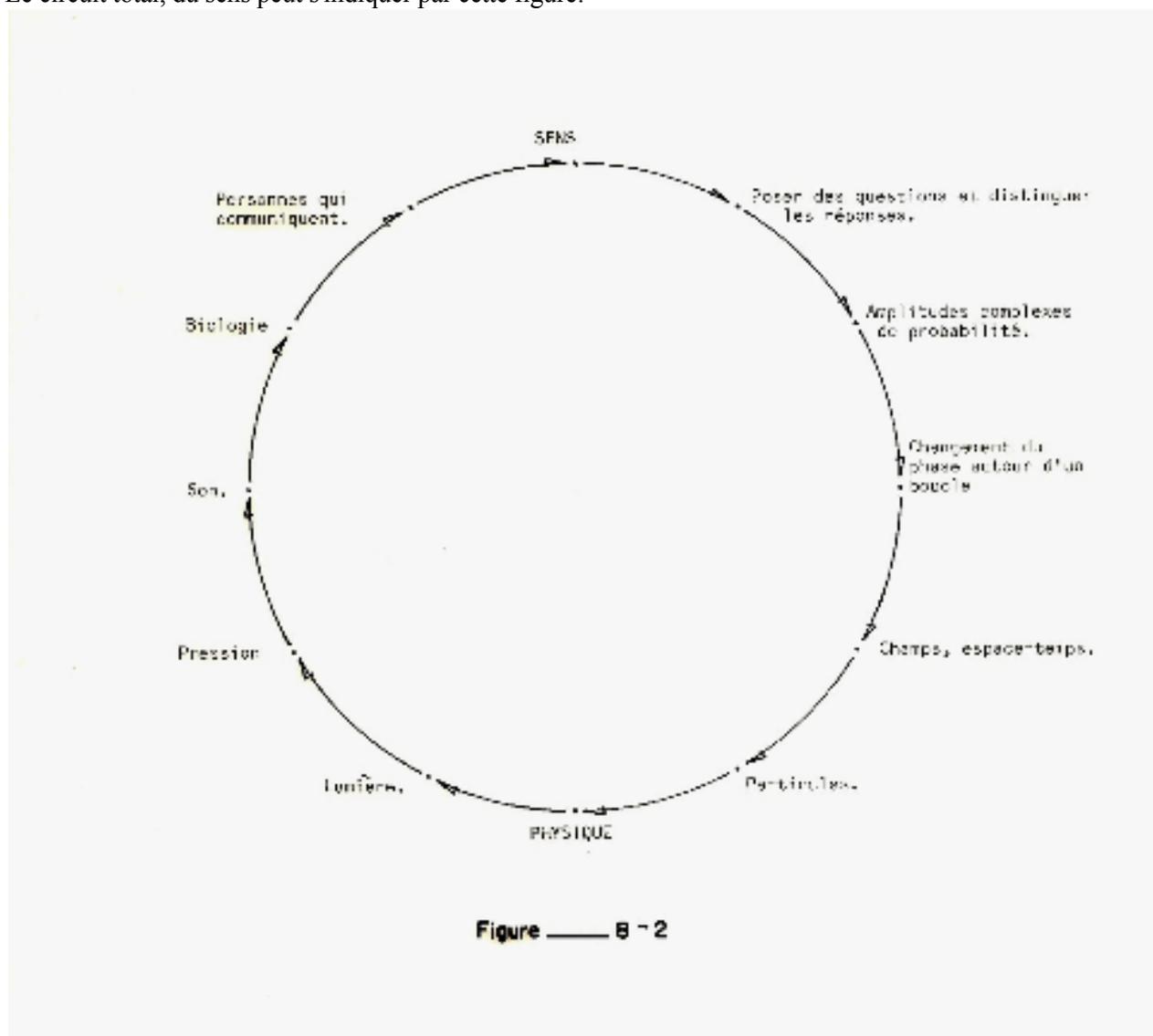
²⁸⁷ Yang, C.N.; Mills, R.L.; "Conservation of Isotopic Spin and Isotopic Gauge Invariance" **Phys. Rev.** Vol. 96, No. 1, 1954 p.191-195

²⁸⁸ Anandan, J.; "Quantum interference and the Classical Limit" **Int. Jour. of Theor. Phys.** Vol.19, No.7, 1980 p.537-556.

Etant donné que les particules peuvent s'obtenir à partir des champs - elles ne sont que des propriétés des champs - nous avons arrivé à la fin de la partie du circuit qui va du sens à la physique. Dans les propres termes de Wheeler:

"Avec les particules qui doivent leur définition et leur existence aux champs, les champs qui doivent leur définition et leur existence aux phases, les phases qui doivent leur définition et leur existence à la "possibilité de distinguer" et à la "complémentarité", et ces derniers aspects de la nature qui ont pour origine l'exigence du sens, nous avons esquissé de façon sommaire les aspects principaux de la 'portion de retour' (celle qui va du sens à la physique) du circuit du sens."²⁸⁹

Le circuit total, du sens peut s'indiquer par cette figure:



8.3. L'EXISTENCE: SOFTWARE SANS HARDWARE

Le sens est constitué par les données dont peuvent disposer les personnes qui communiquent.

²⁸⁹ Réf. (272)

Ces données sont en dehors de ces personnes, elles sont dans le monde, dans l'univers, dans la Nature. Dans une conception réaliste cette Nature est "en soi". Mais afin que les données puissent être partie du sens il faut qu'elles soient perçues et communiquées par ceux qui communiquent. Seulement quand ces données sont transformées en *information* elles peuvent être utilisées pour construire le sens. La perception et la communication des données de la part de ceux qui communiquent constituent un *software* et la Nature, dont ceux qui communiquent sont eux mêmes une partie, constitue le *hardware*.

Rappelons les définitions de *hardware* et *software*. D'une manière très simple nous pouvons dire que le software est constitué par l'ensemble des programmes, procédés et règles relatifs au fonctionnement d'un ensemble des organes physiques d'un système informatique, ces derniers constituant le hardware.

Dans une conception réaliste l'idée de sens proposée par Follesdal peut être interprétée en disant qu'il existe un hardware physique qui est la base de software. Le hardware est à objectivité forte et le software est à objectivité faible.

Dans la conception de Wheeler le hardware se ramène finalement au software parce que pour lui le référent ultime est le sens. La recherche du sens est à l'origine du monde, de la Nature. La "Nature" dans la théorie de Wheeler est en conséquence à objectivité faible. Nous comprenons maintenant pour quoi Wheeler affirme:

"Comment est-il possible pour quelqu'un même de songer à abandonner pour la fondation de l'existence un hardware physique situé là dehors et à mettre à place un software de sens situé on ne sait pas où? (...) nonobstant toutes les difficultés, et elles sont très grandes, ceci doit être néanmoins le but et la réalisation (l'achèvement) de la prochaine Troisième Epoque de la Physique."²⁹⁰

Maintenant nous devons faire un commentaire très important à notre avis: Dans la proposition de Wheeler le monde, ce qu'il appelle parfois *la physique*, parfois *la nature*, est finalement réduit à *nous*, puisque sa définition et son existence sont dues à la recherche du sens, recherche que *nous* faisons. C'est nous qui créons, en conséquence, le monde.

Nonobstant ceci, nous ne devons pas conclure que la position de Wheeler est celle d'un *idéalisme* radical, si par ce mot nous comprenons une position sur l'existence selon laquelle la réalité ultime sont les idées ou l'aspect mental (en Anglais *the mind*) des observateurs, dans notre cas ceux qui communiquent. A notre avis la thèse de Wheeler est beaucoup plus subtile.

En effet, dans sa théorie il existe en dehors de nous un monde physique auquel nous devons notre existence. Le "sens" n'est pas seulement nos idées, le "sens" est constitué de données qui existent en dehors de nous et que nous percevons et communiquons. Néanmoins, ce monde physique, qui existe en dehors de nous, n'a pas une existence indépendante de nous parce qu'il doit son origine à notre recherche de sens. Il dépend de nous de la même façon que nous dépendons de lui. L'un sans l'autre ne peuvent pas se concevoir dans la thèse de Wheeler. Le monde et nous nous engendrons mutuellement.

Il est clair aussi de la discussion précédente que nous ne pouvons non plus, qualifier la thèse de Wheeler ni comme un *approche linguistique* dont le référent ultime sont

²⁹⁰ Réf. (272)

nos impressions intersubjectives, ni de *matérialiste* si par ce mot nous comprenons une position sur l'existence selon laquelle la réalité ultime est la matière - en supposant que nous pouvons donner une définition précise de ce mot - dans notre cas la physique, la nature.

A notre avis dans la thèse de Wheeler, le physique et le mental sont dans le même plan en s'engendrant mutuellement. Pour nous, dans les idées de Wheeler, plus important que le point précédent est ceci: que nous ne devons pas chercher un *hardware* physique comme fondement de ce software qui est le "circuit fermé du sens".

A notre avis, quand Wheeler se réfère à un *hardware* il veut dire une réalité indépendante. Ce que propose Wheeler est donc une "cosmogénèse non-ontologique" et par ce dernier mot nous voulons dire non-fondée sur les idées d'une réalité indépendante. En effet, ce dernier concept ne joue aucun rôle dans sa thèse et quand il parle de la nature il se réfère, à notre avis, au monde physique, lui même à objectivité faible.

Cette interaction entre nous et le monde est illustrée par Wheeler avec ce qu'il appelle le "jeu des vingt questions dans sa version surprise".

Considérons le jeu connu des vingt questions dans lequel une personne sort du salon et les autres choisissent un mot. Quand la première personne revient au salon elle commence à poser des questions sur le mot. Si elle arrive à deviner le mot avec vingt questions ou moins, elle gagne, dans un autre cas elle perd.

Dans la "version surprise" du jeu proposée par Wheeler, les personnes qui restent dans le salon se mettent d'accord à ne choisir aucun mot. Elles pourront répondre comme elles voudront par "oui" ou par "non" à la question de la personne qui a sorti, mais n'importe quelle soit la réponse donnée elles doivent avoir en tête un mot qui soit compatible avec leur propres réponses aussi bien qu'avec les réponses précédentes.

Wheeler fait d'abord une comparaison entre la version originale du jeu et la physique classique. De même que dans le jeu original on regarde le mot comme déjà existant "là dehors", dans la physique classique on considère la position et l'impulsion d'un électron comme déjà existants indépendants de tout acte d'observation. La version surprise du jeu présente en revanche, dit Wheeler, plusieurs similitudes avec la situation dans la mécanique quantique. En effet:

i) L'information sur le mot a été appelée à l'existence pas à pas au moyen des questions que ont été posées. De manière similaire l'information sur un électron est appelée à l'existence au moyen des expériences que l'observateur choisit de faire. Les données ne sont pas préexistantes au questionnement, elles sont créés par le questionnement.

ii) Si dans le jeu surprise on pose des différentes questions on finit avec un autre mot de même façon que l'expérimentateur finit avec une autre histoire sur le comportement de l'électron s'il choisit de faire d'autres expériences différentes.

iii) Les questions que l'on pose ont une influence sur le mot qui finalement apparaît mais en une grande partie elle est due aux réponses "oui" ou "non" que ont donné les autres personnes dans le salon. La détermination du mot dépende en partie de choix de ces personnes. Elles jouent le rôle qui es celui de la "nature" dans une expérience quantique typique dont le résultat est incertain.

Ici nous devons remarquer encore une fois que Wheeler emploi, à notre avis, le mot "nature" pour se référer au monde physique qui existe en dehors de nous mais qui a une objectivité faible.

D'autre part ici nous voyons de différences essentielles entre le "jeu surprise" et ce qui, selon Wheeler, se passe dans la mécanique quantique. La première différence Wheeler même la remarque quand il dit que le jeu n'a pas beaucoup de participants et qu'il se finit rapidement. Le processus de faire des observations est, par contre, un processus continu et en plus est très difficile d'établir de façon claire et précise où commence et où finit la communauté de ceux qui communiquent.

Une autre différence que nous remarquons est ceci: dans le jeu, le mot n'a pas une existence indépendante de ceux qui communiquent et en particulier du questionnement de la personne qui veut deviner le mot - on devrait dire la personne qui, avec la collaboration des autres, va à créer le mot - mais les personnes qui communiquent ont une existence indépendante du mot en question.

Dans le cas de la mécanique quantique, selon Wheeler, l'électron - et en général le monde physique - n'a pas d'existence indépendante de ceux qui communiquent, mais ceux-ci, dépendent eux-mêmes du monde physique.

iv) Dans la version surprise il y a une "règle du jeu" qui demande que la réponse "oui" ou "non" choisie par chaque personne soit compatible avec quelque mot. De façon similaire il y a une cohérence en ce qui regarde les observations dans la physique quantique: Chaque personne doit être capable de dire à d'autres dans le langage courant ce qu'elle a trouvé et les autres personnes doivent être capables de vérifier l'observation.

Au moyen de cet apologue du jeu surprise nous voyons d'une autre perspective la nécessité pour un phénomène quantique d'être un phénomène observé: dans le "jeu surprise" aucun mot n'est pas un mot tant qu'il n'est pas un mot promu à l'existence par le choix des questions posées et les réponses données et, dans la physique quantique aucun phénomène n'est un phénomène tant qu'il n'est pas un phénomène observé.

8. 3.1. Le problème du temps.

Il y a un grave problème auquel se heurte la thèse de Wheeler et c'est celui du temps. Laissons Wheeler même, avec sa prose évocatrice et éloquente, nous décrire le problème en question:

"Que pouvons nous dire sur tous ces milliards d'années au début de l'univers quand il n'y avait pas ceux qui peuvent communiquer pour établir le sens? Toutes ces galaxies n'étaient elles pas auparavant aussi réelles qu'elles le sont maintenant? Et ces galaxies qui ne sont pas encore visibles aujourd'hui mais apparaîtront dans l'horizon demain, ne sont-elles pas aussi réelles maintenant?"²⁹¹

Wheeler admet qu'il n'est pas évident de trouver des réponses à ces questions et il nous rappelle que sa proposition n'a pas la prétention d'être une théorie complète et qu'elle constitue plutôt une série de lignes très générales qui, à son avis, doivent être suivies

²⁹¹ Réf. (272)

dans la création de la "Physique de la Troisième Epoque".

Wheeler suggère de considérer que dans la partie du "circuit du sens" qui va de la physique au sens l'ordre normal du temps est valable.

Par contre, dans la partie du circuit qui va du sens à la physique il n'y a pas de raisons, selon Wheeler, pour affirmer que l'ordre normal du temps - et même la notion de temps - soit valable. Après tout, affirme-t-il, un phénomène quantique n'est pas localisé dans l'espace et le temps. Il considère que le concept du temps est une invention humaine de la même nature que par exemple le concept d'élasticité. Le temps n'est donc pas, selon Wheeler, une entité primordiale dans la description de la nature, mais plutôt une entité secondaire que nous devons dériver de considérations plus primitives. Il conclut que cette dérivation doit être l'une des tâches et des opportunités principales de la Physique de la Troisième Epoque: "La physique du sens."

8.4. COMMENTAIRES

8.4.1. *La théorie de Wheeler : Un aboutissement des thèses de Bohr*

La théorie de Wheeler peut être considérée comme un essai visant à donner une cohérence manifeste aux idées de Bohr. On peut dire aussi qu'elle constitue un aboutissement de la pensée bohrienne. En effet, nous avons dit qu'une possible interprétation de l'usage fait par Bohr du mot "nature" est qu'il se réfère par ce mot à la réalité extérieure à nous laquelle n'est pas pour lui indépendante de nous. Nous nous sommes demandés dans le chapitre 6 comment si tel était le cas pourrait s'expliquer l'interdépendance entre la nature, qui dépend de nous, et nous mêmes qui sommes, selon lui, un produit de cette nature. Dans la théorie proposée par Wheeler nous trouvons une façon d'expliquer cette interdépendance, à savoir: nous produisons la nature et la nature nous produit à nous mêmes, au moyen du circuit fermé du sens.

D'autre part, là où Bohr ne présente qu'un *argument* pour justifier son refus de chercher une ontologie, Wheeler propose, même que d'une façon très schématique, une *théorie* de l'"existence" dans laquelle l'hypothèse d'une réalité indépendante n'a pas de place.

Certes, la théorie dont il s'agit a de graves problèmes à résoudre - comme celui du temps - avant qu'elle ne puisse être considérée comme une théorie complètement cohérente, mais malgré cela une théorie constitue à notre avis un pas en avance sur un simple argument.

8.4.2. *Le rôle du langage dans la théorie de Wheeler*

Tout d'abord nous devons souligner qu'en adoptant la définition de sens de Follesdal, Wheeler fait un choix philosophique. En effet, dans une autre conception de la philosophie du langage il se fait une différence entre le *réfèrent* d'une expression linguistique, qui est défini comme l'ensemble des données auxquelles s'applique l'expression, et le *sens* défini comme le contenu de la représentation intellectuelle que l'expression est supposé d'exprimer. A notre avis Follesdal ne fait pas cette distinction et identifie le sens avec le réfèrent.

Si l'on fait la distinction en question on peut soutenir que l'idée de réalité indépendante

n'est pas nécessairement dénuée de sens.

Ayant identifié le choix linguistique fait par Wheeler et qui soutient sa théorie, nous pouvons dire que en aucune des interprétations et théories étudiées dans ce Thèse, le rôle du langage n'est plus fondamental que dans la théorie de Wheeler. En effet, le référent ultime de Wheeler est le sens: une notion qui appartient à la théorie du langage. D'autre part, et c'est Wheeler même qui le souligne, pour lui la fondation de l'existence est un software de sens, c'est - à - dire c'est le traitement que, en communiquant les uns avec les autres, nous faisons de l'information dont nous disposons, qui finalement crée le monde. Et ce monde crée par nous est à l'origine de nous mêmes. A notre avis la conclusion logique de la théorie de Wheeler est que c'est le langage finalement qui est à l'origine de la nature et de nous mêmes. Ici le langage est, en conséquence, prépondérant. Selon notre interprétation dans la thèse de Wheeler ce ne sont ni le mental ni le physique qui constituent l'aspect primordial, mais plutôt c'est le verbe peut-être le logos présocratique - qui joue le rôle créatif dans l'origine de l'existence.

8.5. LE REEL VOILE DE D'ESPAGNAT. LA NOTION DU REEL EST NECESSAIRE

d'Espagnat considère que la notion du réel est nécessaire pour la pensée. Il reconnaît que

"(...) on ne saurait 'en toute rigueur' ni démontrer le réalisme ni même le définir par le discours (...)." ²⁹²

mais affirme que de la constatation précédente on ne doit pas conclure à la fausseté du réalisme. Pour lui un argument extrêmement puissant en faveur de la thèse réaliste est constitué par les difficultés auxquelles se heurte la démarche opposée. Dans ce contexte il examine la conception purement linguistique selon laquelle l'impossibilité de construire une définition opératoire de la notion de réalité indépendante implique que cette notion n'a pas de sens.

d'Espagnat analyse les difficultés techniques bien connues de la conception purement linguistique telles que: la justification du principe de vérifiabilité sur lequel se fonde la conception en question, le problème de l'induction, plus aigu dans la démarche purement linguistique que dans la démarche réaliste, et la difficulté d'éluder le solipsisme, position selon laquelle je serais moi même le seul existant.

Aux difficultés précédentes d'Espagnat ajoute deux objections d'une nature plus générale:

La première est la difficulté de distinguer entre les lois de la nature et les méthodes - approchées en général - au moyen desquelles les scientifiques élaborent des prévisions observationnelles. Dans une position réaliste nous distinguons d'une part les lois et les principes physiques de la réalité et d'autre part les approximations que nous employons pour l'étude de ces lois et principes. Dans l'approche purement linguistique nous n'avons aucune raison pour faire la distinction en question et il peut arriver que les algorithmes de calcul soient progressivement hypostasiés en éléments d'une description de la nature sans que les théoriciens responsables soient même conscients du glissement. d'Espagnat cite comme exemple le cas de la notion *d'état virtuel* dans la théorie quantique des champs. Dans la position purement linguistique existe donc le danger d'une prolifération de modèles mutuellement incompatibles chacun ayant quelque succès et

²⁹² d'Espagnat, B. **Une incertaine Réalité**, (Gauthier-Villars, Paris, 1985) p. 184

quelque échec mais à partir desquels il n'est possible d'obtenir aucune idée un peu synthétique du réel.

La deuxième objection de d'Espagnat est l'existence du danger de priver les scientifiques des motivations pour faire leur travail, s'ils arrivent à prendre véritablement au sérieux la conception purement linguistique. d'Espagnat présente le cas d'un paléontologue dont la motivation serait non pas la conviction de que tels ou tels animaux ont réellement existé -c'est- à -dire indépendamment du chercheur lui même et de ses semblables - mais la possibilité que son recherche lui fournisse d'écrire des articles scientifiques dont le contenu harmonisera avec celui d'autres articles scientifiques.

En plus de la discussion critique que de façon détaillée fait d'Espagnat de l'approche purement linguistique, il présente un argument qui, dans l'essentiel, est le suivant:

Nous pensons en général à quelque chose et nous avons la certitude qu'en tout cas au moment où nous pensons quelque chose au moins *existe – est* - à savoir notre pensée même. En conséquence nous ne pouvons pas écarter la notion d'être comme dénué de sens. Compte tenue de la conclusion précédente, dire que la réalité indépendante n'existe pas ou n'a pas de sens c'est finalement

" (. . .) spécifier que seul l'homme pensant existe, ou du moins c'est spécifier que l'affirmation de l'existence ne peut être posée légitimement que secondairement à lui."²⁹³

d'Espagnat refuse cette idée de prétendre subordonner aux hommes l'existence elle même comme une idée aussi gratuite que celle du solipsisme.

La conclusion finale de d'Espagnat est exprimée par lui même dans ces termes:

"J'exige l'existence d'un réel, tout court. Autrement dit j'estime, pour les raisons qui sont développées ci-dessus, que la prise de position qui consiste à rejeter la notion même de réalité indépendante sous le prétexte que cette notion n'aurait pas de sens frise en définitive l'incohérence de la pensée."²⁹⁴

d'Espagnat souligne aussi que les arguments qu'il présente gardent leur force même si la réalité indépendante à laquelle ils se réfèrent n'est pas connaissable en détail par l'homme.

La position de d'Espagnat contient, implicitement du moins, l'idée que cette réalité indépendante est une *explication* des phénomènes et il précise que la notion d'explication dont il s'agit n'est pas celle de cause mais plutôt la notion de *raison d'être*. La réalité indépendante est, donc, la raison d'être des phénomènes.

Une ontologie doit avoir des connotations très générales qui ont rapport avec notre vision du monde. A notre avis c'est pour cette raison que d'Espagnat analyse les possibles effets qu'une "cosmovision" centrée sur l'idée de l'être aurait sur la vision que l'homme actuel possède du monde, et de son rôle dans le monde. Il constate que cette vision n'est actuellement ni très nette ni très satisfaisante et il affirme

"(...) il est banal de constater que l'homme moderne ploie sous le joug soit de la

²⁹³ Réf. (292) p.187

²⁹⁴ Réf. (292) p.224

misère soit de la répression idéologique, soit, au mieux, de la vanité consummatrice. (...) Un tel état de chose a suscité beaucoup de tentatives d'explications. Il en est une à laquelle on ne pense pas très souvent mais qui, outre le fait qu'elle est plausible en soi (...) vaut d'être considérée ici (...) En bref, et très, abruptement, l'explication en question serait que l'homme contemporain - l'occidental au moins s'est volontairement privé de tout contact, réel ou supposé, avec quoi que ce soit qu'il puisse, de façon sensé, nommer 'l'être' ou - moins ambitieusement - 'la réalité extérieure donnée'."²⁹⁵

8.6. LE REEL N'EST PAS PHYSIQUE

Nous venons de voir que les raisons qui incitent d'Espagnat à accepter l'idée de l'existence d'une réalité indépendante sont des raisons que l'on peut qualifier de philosophiques puisque, comme lui même l'exprime :

"(...) elles ne me sont pas dictées par mon savoir scientifique (...)." ²⁹⁶

En ce qui concerne sa thèse de ce que le réel n'est pas physique, c'est-à-dire n'est pas connaissable au moyen de la physique, la situation est très différente. d'Espagnat arrive à sa conclusion à *posteriori* après une analyse exhaustive et détaillée de toutes les tentatives qui ont été faites et qui sont faites actuellement pour construire une physique à objectivité forte qui soit en accord avec les données de la mécanique quantique.

Il défini sa démarche avec ces termes:

"Dans le principe notre programme,(...) consiste à partir de réalismes très naïfs, à les réfuter, s'il est possible, en examinant leur conséquences et en montrant que l'une au moins de celles-ci est fausse, à nous tourner alors vers un réalisme moins naïf, à réitérer en ce qui concerne l'opération dont il s'agit et ainsi de suite." ²⁹⁷

Dans cette section nous ne faisons pas - et nous ne saurions pas le faire - une analyse critique d'une démarche à laquelle d'Espagnat a dévoué plusieurs ouvrages.²⁹⁸ Nous nous limiterons en conséquence à montrer les arguments généraux qu'il présente pour écarter certains parmi les différents réalismes qu'il analyse dans ses livres.

8.6.1. Théories qui considèrent la fonction d'onde comme étant une description de la réalité.

Ces théories sont déterministes puisque la fonction d'onde obéit à l'équation déterministe de Schrödinger. Elles se heurtent au problème de la mesure duquel nous avons déjà parlé. La conclusion de d'Espagnat²⁹⁹ est que pour résoudre le problème de la mesure toutes les théories actuelles de la mesure doivent payer un prix, lequel consiste en faire référence à une étape ou à une autre à l'impossibilité pratique ou l'homme se trouve d'effectuer telle ou telle mesure particulièrement difficile. En conséquence nous ne pouvons pas considérer que ces théories réconcilient la physique quantique avec le réalisme physique.

²⁹⁵ d'Espagnat, B.; **A la recherche du réel** (Gauthier-Villars, Paris, 1.981 2e. éd.) p.157

²⁹⁶ Réf. (292) p.157

²⁹⁷ Réf. (292) p.99

²⁹⁸ Voir par exemple Réf. (292) et (295)

²⁹⁹ Voir par exemple d'Espagnat, B.; "Empirical Reality, Empirical Causality and the Measurement Problem". **Found. Phys.** 17, 1.987 p.507

Une difficulté additionnelle à laquelle se heurte une théorie de la mesure - qui vise à considérer la notion de réduction du vecteur d'état comme fait réel, c'est-à-dire à objectivité forte - est l'impossibilité qu'il y a, semble-t-il, à concilier au sein d'une théorie objective *au sens fort* la réduction du vecteur d'état intervenant lors de mesures avec la relativité.³⁰⁰

Les faits précédents conduisent d'Espagnat à conclure que la construction d'une théorie de la mesure qui soit satisfaisante est du moins douteuse.

8.6.2. Le micro réalisme local.

Le micro réalisme est une conception réaliste dans laquelle les entités auxquelles nous donnons le nom de particules ont à chaque instant une position bien déterminée et " par symétrie " une vitesse bien déterminée.

Les versions locales du micro réalisme sont celles qui obéissent au principe de séparabilité. Elles sont écartées compte tenu des données qui ont rapport avec le théorème de Bell.

8.6.3. Théories à variables cachées non-locales.

Ces sont des théories du type de Broglie - Bohm. Nous avons déjà parlé de ces théories et nous en parlerons davantage dans les prochaines sections mais nous pouvons rappeler qu'elles reposent sur l'idée que l'indéterminisme quantique ne serait en définitive qu'un indéterminisme apparent, dû uniquement à l'ignorance de détails fins. Ces théories tentent de compléter la description quantique par l'hypothèse de l'existence de paramètres supplémentaires qui, le plus souvent, diffèrent d'un système physique à l'autre même quand ces deux systèmes ont la même fonction d'onde. Les théories dont il s'agit sont en conséquence déterministes.

L'argument essentiel de d'Espagnat pour écarter ces théories est qu'elles constituent une *immunisation* non-réussie, c'est-à-dire elles sont réduites au niveau des *hypothèses ad hoc*. Une immunisation consiste en l'introduction d'une hypothèse supplémentaire au moyen de laquelle on tente de préserver une théorie tenue jusqu'alors pour satisfaisante des atteintes de telle ou telle objection particulière fondée par exemple sur une découverte nouvelle. Deux conditions doivent être remplies par une immunisation avant qu'elle ne puisse être considérée comme réussie:

- a) Elle ne doit amoindrir ni la simplicité ni le pouvoir de synthèse global de la théorie initiale.
- b) Elle doit être féconde, c'est-à-dire doit permettre la prédiction de faits non encore observés et dont l'expérience vient à confirmer *à posteriori* l'existence.

Les théories à variables cachées n'ayant jusqu'à présent remplie la deuxième condition elles ne peuvent être considérées comme satisfaisantes.

d'Espagnat admet que l'on peut contester l'application du deuxième critère, à

³⁰⁰ Ref. (292) Chap. 6

savoir celui de la fécondité, à une *interprétation* d'une théorie. Par conséquent il analyse les conséquences de la non-séparabilité, c'est-à-dire du caractère non-local des théories dont il s'agit.

Pour prendre en compte la violation du principe de localité, les théories à variables cachées non- locales doivent admettre la propagation plus rapide que la lumière d'influences ne permettant pas la transmission de signaux. Cela pose de problèmes conceptuels très ardues parce-que, comme nous l'avons vu dans le chapitre 5, il n'est pas possible de spécifier d'une manière absolue lequel des événements - mesure est le premier dans le temps.

La difficulté à donner une solution satisfaisante à la question précédente est pour d'Espagnat une indication de ce que la première condition d'une immunisation réussie - l'exigence de simplicité et de synthèse - n'est pas non plus remplie par les théories à variables cachées non-locales, et risque fort, nous dit-il, de ne jamais l'être sinon au prix d'une véritable transformation de l'idée de déterminisme. Il ajoute:

"Ceci justifie pour une bonne part le scepticisme que la majorité des physiciens contemporains éprouvent à l'égard de l'interprétation déterministe par paramètres cachés que nous avons ici considérée."³⁰¹

d'Espagnat analyse d'autres sortes de théories réalistes³⁰² et sa conclusion finale est qu'aucune d'entre elles n'est vraiment satisfaisante. Il affirme que si le réalisme physique - qui, rappelons- nous, est la conception selon laquelle il est supposé que la physique peut légitimement aspirer à décrire la réalité en soi -est une théorie juste, on doit s'attendre à ce que au fur et à mesure de son développement la physique arrive à créer des théories de plus en plus générales et qui ne soient jamais *durablement* rivales et que ces théories doivent être formulées comme descriptions du réel, c'est-à-dire à objectivité forte.

Il remarque que dans sa formulation habituelle la mécanique quantique satisfait au critère d'unicité mais non à celui de l'objectivité forte. D'autre part ces théories à objectivité forte telles que les théories à variables cachées non-locales, dont on peut dire que dans un certain sens elles aboutissent, ne satisfont pas la condition d'unicité puisqu'elles sont multiples sans qu'un moyen existe de scientifiquement les départager.

Aux conclusions précédentes d'Espagnat ajoute la constatation que la physique moderne n'est pas engagée dans la voie réaliste, mais, au contraire, elle est de plus en plus opérationnaliste. Il conclut:

"(...) le réalisme physique représente un 'idéal' dont nous sommes extrêmement loin. Et une comparaison avec les conditions qui ont régné dans le passé nous montre même que nous sommes considérablement plus loin de la réalisation de l'idéal dont il s'agit que nos prédécesseurs ne pensaient l'être il y a cent ans."³⁰³

8.7 LE REEL VOILE

Pour arriver a la conclusion principale de sa thèse, celle de sa conception de la réalité, d'Espagnat met l'accent sur ce qu'il appelle:

³⁰¹ Réf (292) p.129

³⁰² Réf (292) Chap. 6 et Réf (295) Chap.9

³⁰³ Réf (292) p.146

"(...) le désaccord protéiforme que l'on voit se manifester, dans maints domaines, entre les règles quantiques et la localité."³⁰⁴

Après une analyse approfondie de la notion de la non-séparabilité, d'Espagnat arrive à la conclusion que les notions d'espace, de temps, d'espace-temps, d'événements et même des positions des choses ne sont rien d'autre que des simples outils servant à la description des phénomènes. Il propose de faire une distinction entre la réalité empirique, qui est l'ensemble des phénomènes et la réalité indépendante. Selon sa conception la réalité empirique est la seule dont l'esprit humain peut avoir véritablement connaissance au sens que la recherche scientifique donne à ce mot. La réalité indépendante n'est en aucune manière dans l'espace-temps lequel tout comme la localité, l'événement et ainsi de suite sont des notions qui doivent beaucoup à la structure de notre esprit.

La réalité indépendante n'est pour d'Espagnat, pas *connaissable* car le sens de ce mot est celui d'une connaissance exhaustive de l'objet visé tel qu'il est vraiment. D'autre part, il remarque que des notions telles que celle d'espace-temps, celle de courbure de l'espace et ainsi de suite ne sont en rien ni des notions familières ni des modes *à priori* de notre sensibilité. Le fait que ces notions très élaborées soient en définitive utilisées par la communauté scientifique plutôt que d'autres, est à ses yeux une indication qu'elles sont dues, au moins en partie, à une information que nous recevons de l'extérieur. Il est naturel de penser, dit d'Espagnat, qu'elles réfléchissent quelque chose de la réalité indépendante, et nous ne pouvons pas dire en conséquence que la réalité soit "inconnaissable". Pour d'Espagnat le réel est voilé et l'épithète en question a une signification intermédiaire entre celles de termes "connaissable" et "inconnaissable".

Selon d'Espagnat, la science, et en général, la raison discursive, ne peut pas nous décrire la réalité telle qu'elle est. Cependant notre raison peut nous révéler les structures générales de la réalité.

Pour illustrer sa thèse d'Espagnat présente une analogie inspirée d'une idée de Bertrand Russel, laquelle consiste à comparer le réel en soi - ou réalité indépendante - à un concert, tandis que la réalité empirique - l'ensemble des phénomènes - est comparée à un enregistrement sur disque ou sur cassette de ce concert. La structure du disque n'est pas indépendante de celle du concert, mais la première, qui est déployée dans l'espace sous forme de minuscules creux et bosses de long des sillons, n'est pas purement et simplement identifiable à la seconde, qui est déployée dans le temps.

De même, explique d'Espagnat, que par exemple un extraterrestre débarquant sur Terre et découvrant le disque peut - s'il a le sens de l'ouïe et assez d'imagination pour conjecturer qu'à l'origine des creux et de bosses qu'il étudie il y a une émission de sons - arriver à la fois à saisir et à goûter l'essentiel du concert, de même nous pouvons deviner et goûter sur un mode non illusoire des traits très significatifs de la réalité en soi. Dire cependant, ajoute d'Espagnat, que nous la connaissons (au sens exhaustif de ce mot) serait abusif.

Avec sa théorie d'Espagnat propose une réponse à la question de savoir pourquoi la réalité empirique peut être comprise par nos esprits. Il considère une sorte de complémentarité entre le mentale et le physique; dans ses termes:

³⁰⁴ Réf(292) p.218

"Il est (...) assez légitime de voir dans l'ensemble des consciences d'une part et l'ensemble des objets de l'autre deux aspects *complémentaires* de la réalité indépendante. Ce qu'il faut entendre par là c'est que ni l'un ni l'autre n'existe en soi mais qu'ils n'ont d'existence que l'un par l'autre, un peu comme s'engendrent les images de deux miroirs qui se font face. Les atomes concourent à créer mon regard mais mon regard concourt à créer les atomes c'est - à- dire à faire émerger les particules hors du *potentiel* dans *l'actuel*; hors d'une réalité qui est un Tout indivisible dans une réalité étendue dans l'espace-temps."³⁰⁵

Si nous admettons, dit d'Espagnat, que nos esprits et la réalité empirique sont des aspects complémentaires d'une seule et même réalité il ne doit pas apparaître très étonnant que les structures générales de cette réalité soient réfléchies dans les mathématiques que nous construisons et d'autre part se manifestent dans la réalité empirique.

On peut se demander si la cosmogénèse proposée par Wheeler est incompatible avec une conception comme celle de d'Espagnat. Plus précisément l'on peut examiner s'il est possible de construire une théorie cohérente dans laquelle une réalité indépendante serait la *raison d'être* de la cosmogénèse de Wheeler et où cette dernière constituerait le mécanisme au moyen duquel s'engendrerait mutuellement les deux aspects complémentaires de la réalité indépendante, à savoir le mentale et le physique.

Etant donné que les idées de Wheeler peuvent être considérées comme une façon de donner une cohérence manifeste aux idées de Bohr, une théorie dans la direction que nous venons d'indiquer constituerait une ontologie dans laquelle l'épistémologie de Bohr pourrait être inscrite.

8.8. COMMENTAIRES

d'Espagnat considère comme peu cohérent de frapper d'exclusion tous les usages de concepts tels que réalité, existence et ainsi de suite non conformes à un code strictement opérationnel. Lui même nous souligne que son argumentation présente des similarités avec celle développée indépendamment par certains philosophes et qui repose sur l'idée de distinguer entre sens et référent d'un concept³⁰⁶ et il critique l'opérationnalisme pour ne faire pas cette distinction. En effet, si on ne fait pas la distinction dont il s'agit on peut soutenir que la notion de réalité indépendante n'a pas de sens.

Compte tenu de points précédents nous pouvons dire qu'il existe une considération linguistique dans la pensée de d'Espagnat, considération qui consiste à faire la différence entre le sens et le référent d'un concept.

D'autre part, si on examine l'argumentation que d'Espagnat présente pour étayer sa thèse selon laquelle la réalité en soi n'est pas accessible à la science l'on peut s'apercevoir que l'argumentation dont il s'agit est fondée sur le fait que la non-séparabilité implique que les concepts d'espace-temps et de causalité ne sont à la fin que des outils servant à la description des phénomènes. A notre avis il existe dans la pensée de d'Espagnat, peut être d'un façon implicite, l'idée que même si la science doit continuer en développant de nouveaux concepts toujours plus abstraits, raffinés et "lointains", le fait que des concepts aussi fondamentaux que ceux de localisation et de causalité se soient avérés être

³⁰⁵ Réf (295) p. 101 (Souligné par d'Espagnat lui-même)

³⁰⁶ Réf. (292) p.271

inadéquats pour décrire la réalité en soi, est une indication de que la science, et en général, la raison discursive ne pourra parvenir jamais à développer les concepts nécessaires pour décrire le réel en soi.

Nous pouvons, peut être, reconnaître cette considération de d'Espagnat dans la citation suivante:

"Certes à priori on pourrait encore espérer, malgré cet abandon (celui du principe de séparabilité) pouvoir conserver les principes du réalisme mathématique: en d'autres termes on pourrait à priori espérer édifier une physique dont les lois et principes seraient objectifs au sens fort. Mais si vraiment la réalité indépendante est non-séparable, que pourrait être cette physique?"³⁰⁷

Nous avons déjà souligné que d'Espagnat arrive à sa conclusion à *posteriori* après avoir fait une analyse exhaustive de toutes les tentatives qui ont été faites pour construire une théorie visant à comprendre les phénomènes quantiques sur la base de l'objectivité forte. Néanmoins, le fait même que de telles tentatives existent et que des physiciens comme Bohm continuent à essayer de créer de nouveaux concepts qui pourraient, selon eux, parvenir à décrire la réalité en soi, est une indication que à la fin la conclusion de d'Espagnat est une possibilité logique qui est fondée sur des faits et sur des considérations concernant la nature du langage et la relation entre ce dernier et la réalité, et qui peut être contestée si l'on fait - comme c'est le cas de Bohm dont nous étudierons les idées dans la prochaine section- d'autres considérations sur le langage.

Ici nous trouvons une ressemblance entre la pensée de Bohr et celle de d'Espagnat, nonobstant que pour le dernier la notion de réel est indispensable tandis que le premier refuse l'ontologie.

En effet, à partir de la considération de que les concepts d'espace-temps et causalité ne sont pas valables pour décrire un objet quantique, Bohr arrive à la conclusion que nous devons accepter l'existence de \hbar sans chercher à l'expliquer. De façon similaire à partir de la considération que les concepts d'espace-temps et causalité ne sont pas valables pour décrire la réalité en soi, d'Espagnat arrive à la conclusion que la raison discursive ne pourra jamais parvenir à décrire la réalité en soi.

Selon Bohr nous n'arriverons jamais à développer un langage qui permette d'expliquer l'existence de \hbar et sa propriété fondamentale : l'indivisibilité.

Selon d'Espagnat nous n'arriverons jamais à développer un langage qui permette de décrire la réalité en soi.

Nous devons souligner, encore une fois, qu'à la différence de Bohr qui n'a guère présenté de raisons pour étayer sa thèse sur l'unicité du langage, d'Espagnat arrive à sa conclusion sur ce que l'on peut appeler *l'impuissance fondamentale* du langage - impuissance pour décrire la réalité en soi - à *posteriori*, après avoir fait une analyse exhaustif des positions contraires à la sienne.

³⁰⁷ d'Espagnat, B.; "A la recherche du réel" **Jour. de Phys.** Colloque No.2, Supp au Jour, de Phys. FASC. 3 p.C2-99 - C2-106

8.9. L'ORDRE IMPLICITE ET L'ORDRE EXPLICITE DE BOHM

8.9.1. L'interprétation causale de la théorie quantique

Dans cette interprétation de la théorie quantique la fonction d'onde et la particule sont toutes deux considérées comme étant réelles au sens fort. La fonction d'onde n'est pas uniquement un symbole mathématique mais elle représente un champ physique à objectivité forte qui est soumis à l'équation de Schrödinger. La particule, également à objectivité forte, obéit à une certaine équation de mouvement.

Nous pouvons résumer ainsi les points principaux de la théorie dans le cas d'une seule particule³⁰⁸:

a) L'équation de Schrödinger pour une seule particule est:

$$i\hbar \frac{\partial \Psi}{\partial t} = -\frac{\hbar^2}{2m} \nabla^2 \Psi + V\Psi \quad (8-4)$$

où m = masse de la particule

V = potentiel classique auquel la particule est soumise

$\hbar = h/2\pi$

\hbar = constante de Planck

Nous pouvons écrire:

$$\Psi = R e^{+i\frac{S}{\hbar}} \quad (8-5)$$

$$P = R^2 \quad (8-6)$$

et obtenir

$$\frac{\partial S}{\partial t} + \frac{(\vec{\nabla} S)^2}{2m} + V + U = 0 \quad (8-7)$$

avec

$$U = -\frac{\hbar^2}{2m} \frac{\nabla^2 R}{R} \quad (8-8)$$

et

$$\frac{\partial P}{\partial t} + \frac{\vec{\nabla} \cdot (P \vec{\nabla} S)}{m} = 0 \quad (8-9)$$

b) La fonction d'onde Ψ représente un champ physique réel au sens fort.

c) En plus du champ Ψ il y a une particule représentée de façon mathématique par ses coordonnées qui sont bien déterminées et qui changent d'une manière bien déterminée.

³⁰⁸ Bohm, D.; Hiley, J.B. "An Ontological Basis for the Quantum Theory", **Phys. Rep.** 144 No. 6 p.323-375

d) L'impulsion \vec{p} de la particule est

$$P = \frac{\vec{\nabla}S}{m} \quad (8 - 10)$$

e) La particule est soumise non seulement à un potentiel classique $V(r)$ mais aussi à un "potentiel quantique" additionnel U donné par l'équation (8-8)

f) Le champ physique Ψ est déterminé de façon causale par l'équation de Schrödinger.

g) L'équation (8-6) peut être considérée comme une équation de continuité avec $P = R^2$ comme densité de probabilité. P a donc deux interprétations: l'une à travers le potentiel quantique et l'autre à travers la densité de probabilité. Bohm propose de considérer que le sens fondamental de R (et indirectement de P) est qu'elle détermine le potentiel quantique. Un sens secondaire est qu'elle donne la probabilité que la particule *soit* dans un endroit donné (et non la probabilité de *trouver* la particule en un endroit donné). Bohm dit que la relation $P = R$ est cohérente avec l'équation de Schrödinger et implique un ensemble de trajectoires, chacune d'elles en accord avec les lois causales décrites par les équations (8-1) à (8-6). Il considère qu'il est donc possible de supposer un processus stochastique additionnel qui peut, par exemple, représenter l'évolution d'un niveau sub-quantique qui conduirait à $P = R^2$ comme une distribution d'équilibre qui est établie au cours du temps.

h) Les prédictions expérimentales de la théorie que nous venons d'esquisser coïncident toutes quantitativement avec les prédictions correspondantes de la mécanique quantique habituelle.

Nous devons souligner que la plupart de formules sur lesquelles se fonde l'interprétation de la mécanique quantique qui vient d'être étudié ont été découvertes par de Broglie³⁰⁹ dans les années vingt et redécouvertes par Bohm au début des années cinquante.³¹⁰ Pour cette raison on a parlé dans les chapitres précédents des théories type de Broglie - Bohm. Nous devons préciser cependant qu'à différence de Bohm, de Broglie ne considère pas, dans ses travaux de 1926 -1927, la fonction d'onde Ψ comme fondamentale. Pour lui il s'agit seulement d'une "onde pilote" qui guide le mouvement de la particule, l'onde fondamentale étant une autre qui indique à la fois le mouvement de la particule et l'endroit où cette dernière est localisée. Cette onde u ;

$$u = R'e^{+i\frac{S}{\hbar}}$$

avait la même phase que l'onde Ψ mais une amplitude R' avec une singularité dans la

³⁰⁹ de Broglie, L."Sur la possibilité de relier les phénomènes d'interférence et la diffraction à la théorie des quanta de lumière" **Comptes Rendus** 18.3, 1927 p. 447-448; "La structure de la matière et du rayonnement et la mécanique quantique ondulatoire" **Compte Rendus** 184, 1927 p.273 -274; "La mécanique ondulatoire et la structure atomique de la matière et du rayonnement" **Journal de Physique et du Radium** 8, 1927 p.225-244

³¹⁰ Bohm, D.; "A suggested interprétation of the quantum theory in terms of 'hiddens variables'", Part I, **Phys. Rev** 8.5, 1952 p.166-179; Part II **Phys. Rev** 85, 1952 p. 180-193

position réelle de la particule. Dans ses travaux des années vingt de Broglie considère que u n'est qu'une autre solution de l'équation de Schrödinger et il appelle sa théorie: la théorie de la double solution.

Après cette précision historique nous continuons avec les conséquences que, selon Bohm, le potentiel quantique implique pour le comportement d'un système quantique.

8.10 EFFETS NON - LOCAUX DE LA FONCTION D'ONDE

Selon Bohm les aspects qualitativement nouveaux du potentiel quantique expliquent les différences qui existent entre les théories classiques et quantiques. Le premier de ces aspects nouveaux que Bohm souligne est que U dépend seulement de la forme de la fonction d'onde et non de son amplitude. En effet, si nous multiplions la fonction d'onde par une constante le potentiel quantique ne change pas. En conséquence, dit Bohm, les effets du potentiel quantique ne diminuent pas nécessairement avec la distance et le système n'est pas nécessairement séparé des aspects de son environnement qui sont très distants. Ainsi, explique Bohm, une particule quantique qui est dans une situation où il n'y a pas de champ classique ne suit pas nécessairement une trajectoire directe car elle est toujours accompagnée par son propre champ Ψ qui peut refléter des aspects lointains de l'environnement. De cette façon nous pouvons comprendre l'interférence d'un électron qui passe à travers d'une de deux fentes d'un diaphragme. Nonobstant que la particule, selon Bohm, passe par une des fentes, le potentiel quantique montre l'effet des deux fentes.

Ce qui compte, conclut Bohm, c'est la forme de la fonction d'onde et non son amplitude; en conséquence la "force" produite par le potentiel quantique n'est pas d'une nature mécanique comme c'est le cas avec une onde classique dont la force qu'elle produit est proportionnelle à l'intensité de l'onde. Dans le cas du potentiel quantique il s'agit, dit Bohm, d'un "contenu d'information". Il explique le sens de l'expression précédente au moyen de cette analogie:

Considérons un bateau qui est contrôlé par le pilot automatique. Le bateau est guidé par des ondes de radar. Les ondes ne poussent pas le bateau d'une façon mécanique mais dirigent le comportement de ce dernier. Nous pouvons considérer le bateau, affirme Bohm, comme un système auto-actif dont l'activité est dirigée par les ondes de radar qui contiennent information sur l'environnement total d'une façon qui dépend uniquement de la forme de l'onde et non de son intensité.

Bohm soutient que, dans ce contexte, l'information contenue dans les ondes de radio a une signification objective puisque, au moyen du pilot automatique, elle joue un rôle actif en guidant le bateau. Il suggère de considérer que la particule répond au potentiel quantique d'une façon objectivement auto active et que le potentiel contient, d'une façon implicite au moins, l'information sur l'environnement total.

Ce que Bohm suggère est donc que le comportement des constituants les plus petits de la matière peut être aussi complexe et subtil que celui des objets à échelle macroscopique et il affirme même que le comportement des particules élémentaires peut dans certains cas être plus complexe que celui des objets macroscopiques.

A ce propos Bohm souligne que dans les distances comprises entre la dimension de l'électron, qui est de l'ordre de magnitude de 10^{-16} cm. et la longueur dite de Planck, qui est de l'ordre de magnitude de 10^{-33} cm -et qui correspond à la distance où les physiciens

supposent qu'ils doivent prendre compte des effets quantiques gravitationnels - il y a de place pour beaucoup de structure, qui peut rendre compte d'une telle réponse complexe de l'électron.

Il remarque:

"La clé fondamentale ici est que le comportement quantique observé de la matière est tellement étrange qu'il est nécessaire d'employer des concepts également étranges si nous voulons comprendre la matière sur une base ontologique."³¹¹

Selon Bohm, ce rôle actif de l'information rend possible une compréhension intuitive de l'indivisibilité de Bohr, mais à la différence des idées de ce dernier, la totalité ici envisagée est analysable au moins conceptuellement d'une façon ontologique.

Le deuxième aspect nouveau du potentiel quantique est mis en évidence, dit Bohm, si l'on considère un système de plusieurs corps. Considérons un système de N particules dont les coordonnées de chaque particule sont $\vec{r}_1, \vec{r}_2, \dots, \vec{r}_N$. Dans ce cas le potentiel quantique est une fonction des coordonnées des particules et du temps:

$$U = U(\vec{r}_1, \vec{r}_2, \dots, \vec{r}_N, t)$$

Bohm signale que le comportement de chaque particule peut dépendre d'une façon non-locale de celui des autres particules et cela nonobstant la distance entre elles. Sur cette non-localité de sa théorie - nécessaire s'il veut qu'elle reproduise les prédictions de la mécanique quantique compte tenu de la violation du principe de séparabilité - Bohm affirme:

"Si le prix pour éluder la non-localité est de rendre impossible une explication intuitive, l'on doit se demander si le prix à payer n'est pas très élevé."³¹²

Il remarque qu'il n'existe pas de contradiction entre la relativité et sa théorie parce que dans cette dernière la transmission de signaux n'a pas lieu.

Nous voyons donc que dans la théorie de Bohm les effets non locaux sont contenus dans Ψ . Pour comprendre mieux la nature de cette Ψ , selon l'explication de Bohm, nous devons approfondir un peu son idée d'information objective, ce que nous ferons dans la prochaine section. Maintenant nous devons étudier le troisième aspect nouveau du potentiel quantique qui est pour lui le plus important de point de vue ontologique.

Il décrit cet aspect avec ces termes:

"(...) Le potentiel quantique U dépend de l'état quantique' du système total d'une façon qui ne peut pas s'exprimer comme une interaction pré-assignée entre les particules."³¹³

Pour illustrer son idée Bohm présente l'exemple de l'atome d'hydrogène dont la fonction d'onde est un produit d'une fonction f des coordonnées \vec{x} du centre de mass du système et

³¹¹ Réf(308)

³¹² Réf(308)

³¹³ Réf(308)

une fonction g des coordonnées relatives \vec{r} des deux particules, l'électron et le proton:

$$\Psi = f(\vec{x})g(\vec{r})$$

Le potentiel quantique, dit Bohm, contient un terme U qui représente l'interaction entre l'électron et le proton:

$$U_1 \propto \frac{\nabla^2 g(\vec{r})}{g(\vec{r})}$$

Le calcul montre que U dépend de l'état particulier du système total. Ainsi par exemple si l'état est celui appelé s , U , est une fonction qui dépend seulement de r ; mais si l'état est celui appelé p , U dépend aussi des angles de r dans un système de coordonnées sphériques fixé dans le centre de masse. En conséquence, affirme Bohm, il est impossible de trouver une fonction de r pre-assignée qui puisse décrire simultanément l'interaction entre l'électron et le proton dans les deux états s et p .

Bohm dit que le concept de totalité dans sa théorie a un sens qui ne peut pas s'exprimer uniquement au moyen de la séparation spatiale entre les particules. La totalité dont il s'agit dépend de la fonction d'onde totale du système, laquelle dépend à son tour de l'état du système mais, ce qui est le plus important, évolue avec le temps selon l'équation de Schrödinger. Bohm ajoute que cet aspect de sa théorie implique qu'aucune interprétation mécanique n'est possible, puisque l'essence d'un comportement mécanique est que les parties du système interagissent d'une façon pre-assignée pour former le tout. Il remarque que même dans le cas où l'interaction est non-locale le système peut être mécanique si le potentiel d'interaction est une fonction fixée et pre-assignée des variables des particules.

8.11 LA REALITE MANIFESTEE ET LA REALITE NON-MANIFESTEE

Bohm soutient que les particules constituent la réalité directement manifestée et que la fonction d'onde, au contraire, ne peut être perçue qu'à travers de sa manifestation dans le mouvement des particules. Il dit que la situation est analogue à celle des théories classiques des champs où les champs ne peuvent se manifester qu'à travers des forces qu'ils exercent sur les particules.

Bohm présente comme justification de cette supposition le fait que - et il le montre dans son article - dans la limite classique, au niveau duquel arrive le contenu de nos données sensorielles, le potentiel quantique peut être négligé. Cela veut dire, affirme Bohm, que tout ce que nous connaissons du monde à travers nos sens doit passer par un niveau où la fonction d'onde ne joue aucun rôle essentiel.

Un autre argument que Bohm présente pour étayer sa thèse est qu'il peut expliquer au moyen de la supposition en question le processus de mesure et la réduction de la fonction d'onde sans aucune référence, même implicite à l'observateur.

Selon lui la connaissance empirique qui se réfère à la fonction d'onde provient en définitive des inférences faites à partir des observations du comportement des structures des particules, telles qu'elles se manifestent dans le niveau classique.

"Cette conclusion est cependant une conséquence de nos suppositions fondamentales concernant la nature de la réalité et ne dépend d'aucune

hypothèse additionnelle concernant le contenu particulière de nos consciences."³¹⁴

Bohm explique quelle est la nature de Ψ en développant son idée selon laquelle la fonction d'onde représente une information objective à laquelle la particule répond d'une manière auto-active.

Nous pouvons comprendre l'idée de Bohm en considérant de nouveau l'exemple du bateau qui est guidé par des ondes de radar. Nous devons distinguer, selon lui:

i) Le porteur d'information qui est l'onde de radar. L'énergie de l'onde ne pousse pas le bateau.

ii) Le système informé qui est le bateau. Il a sa propre énergie à partir de laquelle il se met en mouvement ou change de mouvement. Cette énergie est beaucoup plus grande que celle de l'onde de radar.

iii) L'information qui est l'activité qui surgit dans le bateau quand l'onde de radar arrive.

L'onde de radar contrôle l'énergie du bateau. Bohm considère que avant l'arrivée de l'onde de radar l'énergie du bateau était informe et que c'est l'onde qui lui donne la forme. Dans ses propres termes :

"(...) l'activité fondamentale de l'information objective est d'imprimer la *forme* à une énergie qui est initialement informe."³¹⁵

Bohm considère aussi que le sens de l'information est l'activité qu'il produit. Dans le cas du bateau, le sens de l'information portée par l'onde de radar est le comportement du bateau.

La nature de Ψ est donc, selon Bohm, celle d'un contenu d'information. Ce contenu d'information est organisé dans un espace à dimensions multiples. Le sens de cette information est le mouvement de la particule qui est dans l'espace-temps. Ce dernier constitue ce que Bohm appelle l'"ordre explicite" de la réalité. Le contenu d'information en revanche est en dehors l'espace-temps, dans ce que Bohm appelle l'"ordre implicite" de la réalité.

Dans ses propres termes:

"(...) nous voyons que le contenu d'information de la fonction d'onde est d'une façon générale dans un ordre implicite non-manifesté (en général à dimensions multiples) en tant que les particules sont dans l'ordre ordinaire explicite de l'espace-temps (...) Le mouvement des particules exprime dans l'ordre manifesté (explicite) le sens du contenu d'information."³¹⁶

Bohm affirme que jusqu'à présent il n'existe aucune théorie sur l'origine du potentiel quantique, mais il suggère que l'information que ce dernier représente est portée dans un niveau beaucoup plus subtil de la matière qui n'est pas encore manifesté dans la recherche physique.

³¹⁴ Réf(308)

³¹⁵ Réf. (308) (Souligné par J.R.CH.)

³¹⁶ Réf. (308)

8.12 L'ORDRE IMPLICITE ET L'ORDRE EXPLICITE

Selon la théorie de Bohm la réalité en soi a deux niveaux: un niveau non-manifesté qui est l'ordre implicite et qui est en dehors de l'espace-temps, et un niveau manifesté qui est l'ordre explicite et qui est dans l'espace-temps. Un exemple qu'il présente pour illustrer son idée de l'ordre implicite et l'ordre explicite est le suivant.

Considérons un dispositif constitué de deux cylindres concentriques en verre, baignant dans un fluide très visqueux tel que la glycérine et pouvant être mis en rotation suffisamment lente pour que le liquide visqueux ne se diffuse pas. Si l'on injecte une gouttelette d'encre indissoluble dans ce fluide visqueux et que l'on tourne un des cylindres lentement, on voit l'encre s'étaler en une trace qui devient progressivement invisible. Quand on revient en arrière, celle-ci redevient visible.

Quand la trace d'encre, dit Bohm, n'est pas visible la distribution de ses particules semble être au hasard, sans aucun ordre. Mais il y a un ordre caché, qui se révèle quand la gouttelette redevient visible. De cet ordre caché nous pouvons dire qu'il est implicite ou enveloppé, en tant que la gouttelette même constitue l'ordre explicite ou développé.

8.13 COMMENTAIRES

Nous pouvons voir, à partir de l'exposition très schématique que nous avons faite de la théorie de Bohm, que pour ce dernier le langage a la possibilité d'évoluer de telle façon qu'il parvienne à décrire la réalité indépendante. Cela peut s'obtenir, selon Bohm, au moyen de l'introduction de nouvelles qualités et propriétés pour la matière. Dans ses propres termes:

"(...) nous voulons souligner ici que la théorie quantique peut être comprise de façon intuitive dans une base ontologique à condition que nous acceptions l'introduction de nouveaux types de qualités et propriétés pour la matière."³¹⁷

La supposition de Bohm selon laquelle le langage peut être raffiné afin de décrire le réel se manifeste, à notre avis, dans l'intérêt qu'il porte à l'étymologie dans ses écrits plus philosophiques. Il est significatif également de constater que dans la collection d'essais que Bohm a publié avec le titre "Wholeness and the Implicate Order"³¹⁸(48), il consacre un chapitre entier à proposer l'essai d'un nouveau mode d'emploi du langage, mode qu'il appelle le "rheomode" et qui, selon lui, pourrait servir à réfléchir dans le langage courant cet aspect de *totalité* qui pour Bohm est l'aspect le plus essentiel de la réalité.

Ce qui est finalement le plus significatif dans la théorie de Bohm est à notre avis qu'en partant d'une supposition précise sur la nature du langage il est parvenu à construire une théorie qui, même si elle est contestable étant donné qu'on peut la considérer comme une immunisation non réussie, peut cependant reproduire sur une base ontologique tous les résultats vérifiables de la mécanique quantique.

³¹⁷ Réf. (308)

³¹⁸ Bohm, D.; **Wholeness and the Implicate Order** (Routledge and Kegan Paul, London 1980)

CHAPITRE 9

CONCLUSIONS

Nous organiserons en trois catégories les conclusions auxquelles nous avons abouti après l'analyse présentée aux 8 chapitres précédents: tout d'abord nous présenterons des conclusions sur le langage, ensuite viendront celles sur la mécanique quantique proprement dit, et enfin nous exposerons celles relatives à la réalité.

Ces trois catégories ne sont pas indépendantes les unes des autres et si nous les avons explicitement séparées c'est pour mieux indiquer qu'il s'agit des conséquences découlant du langage, de son rôle dans la science, et de la relation qui existe entre la réalité et le même langage; conséquences qui se dégagent d'une analyse approfondie des interprétations du formalisme quantique.

Ces trois catégories de conclusions justifient le titre de notre Thèse " Langage, Mécanique Quantique et Réalité."

9.1. SUR LE LANGAGE

Une des premières constatations qu'il est possible de faire à partir d'une étude des diverses interprétations de la mécanique quantique concerne le rôle fondamental qu'y jouent les considérations sur le langage et son usage.

Toutes les interprétations en question sont fondées sur des thèses relatives à la nature du langage.

En effet,

A. Pour Bohr, la thèse fondamentale est qu'il est impossible de créer un nouveau langage différent du langage classique, lui même étant un raffinement du langage courant. Nous avons appelé la thèse en question: *l'unicité du langage*.

B. Heisenberg soutient la thèse de l'unicité du langage. Néanmoins cette thèse ne l'empêche pas d'affirmer son idée d'une réalité en soi potentielle, en s'écartant de la prescription stricte de Bohr de n'employer aucun concept à moins d'avoir une expérience qui peut le définir.

C. Pour Wheeler, qui propose une théorie pouvant être considérée comme un aboutissement des idées de Bohr, le langage est tellement fondamental qu'il lui assigne même le rôle créateur dans ce qu'il appelle le "circuit fermé" de l'existence.

D. d'Espagnat considère que la non-séparabilité, en montrant que les concepts de localisation et de causalité ne sont pas valables pour décrire le réel, nous indique que nous n'arriverons jamais à construire un langage adéquat pour décrire la réalité en soi. Nous avons appelé cette thèse: l'impuissance fondamentale du langage.

E. Pour Bohm, la science doit créer de nouveaux concepts afin de pouvoir décrire la réalité en soi.

Ce rôle prépondérant du langage trouve son explication dans le fait qu'une condition indispensable pour faire de la science est la possibilité de mettre au point un langage dénué d'ambiguïté. Non seulement, les scientifiques ont besoin d'un tel langage pour arriver à l'accord intersubjectif sans lequel il n'existe pas de possibilité d'avoir une science, mais les résultats expérimentaux qui permettent de décider sur l'accord des théories scientifiques avec l'expérience, doivent eux mêmes s'exprimer au moyen d'un langage non-ambigu. L'utilisation d'un langage dénué d'ambiguïté constitue, par conséquent, un critère très général de scientificité.

Nous ne devons donc pas être surpris de constater que dans une situation telle que celle que nous trouvons dans le domaine quantique où nous sommes obligés d'examiner les fondements mêmes de la science, les considérations sur le langage, sur sa nature et sur son usage figurent au premier plan des réflexions scientifiques.

Si nous acceptons que la science peut être ou pragmatiste ou fondamentaliste il est aisé de voir que la portée de la science est, en fait, plus large qu'on ne le pense. En effet, quand la science se veut pragmatique, son but principal est de faire des prédictions sur ce que nous pouvons observer dans des situations différentes. Si, par contre, la science se veut fondamentaliste, son but premier sera la compréhension de la nature fondamentale des choses. Malgré la différence des objectifs, les deux versants de la science se supportent mutuellement: dans son rôle pragmatique, la science présente des faits qu'elle se propose d'expliquer dans son rôle fondamentaliste; dans ce dernier rôle, en retour, elle se munit des concepts qu'elle peut utiliser dans son rôle pragmatique.

La caractérisation précédente du double rôle de la science implique que cette dernière va au-delà de la seule constatation de l'accord des algorithmes mathématiques des théories physiques avec l'expérience. Dans son rôle fondamentaliste, la science doit prendre en considération la condition même qui permet son exercice et au moyen de laquelle il est possible de donner sens aux énoncés scientifiques; sens susceptible d'être confronté avec l'expérience. Et cette condition, nous l'avons dit, consiste en ce que le langage utilisé soit dénué d'ambiguïté.

Dans son rôle fondamentaliste, la science étudie principalement le langage et son usage. La situation que nous trouvons au sujet des fondements de la mécanique quantique en est un exemple.

Au rebours de l'opinion des scientifiques qui, comme Feynman ³¹⁹(1), semblent croire que le rôle de la science est strictement pragmatique, nous considérons que l'absence de "doute expérimentale" sur les amplitudes de probabilité n'implique pas que la recherche d'un sens pour ces mêmes amplitudes, soit un affaire qui ne concerne pas les scientifiques.

La science est un tout, d'une certaine façon indivisible, et nous ne devons pas la fragmenter ou, ce qui serait le plus grave, lui ôter son côté fondamentaliste, sans lequel cette même mécanique quantique - réputée avec justice comme un algorithme extrêmement fructueux - aurait difficilement pu être créée. Notre analyse des idées de Niels Bohr montre clairement les deux cotés de la science dans le meilleur de leur action. Il n'est pas possible de séparer les réflexions de Niels Bohr sur les fondements de la science des résultats

³¹⁹ Feynman, R.P.; **Q.E.D. The strange Theory of Light and Matter**. (Princeton University Press. Princeton. 1.985)

pragmatiques que lui-même et ses disciples ont obtenu pour établir l'algorithme quantique. Bien que la mécanique quantique fût créée, non seulement par Bohr et son école, mais aussi par des scientifiques qui, comme Planck, Einstein, de Broglie et Schrödinger, ne partageraient pas ses idées sur les fondements de la science, ces derniers combinaient eux aussi dans leur recherche les côtés pragmatique et fondamentaliste de la science. Il est difficile d'imaginer comment le formalisme quantique - considéré, maintenant, sinon de manière explicite, du moins en pratique, comme dépourvu de sens, ou, ce qui est pire, comme pouvant en avoir un, mais alors, sans qu'il soit du ressort de la science - pourrait exister aujourd'hui si tous les fondateurs de la mécanique quantique eussent, dans leur recherche, négligé le côté fondamentaliste de la science.

Notre analyse nous conduit, en conséquence, à présenter un plaidoyer pour une science complète, une science qui ne soit pas impuissante à parler du monde et à l'interpréter et nous devons remarquer que, dans son rôle fondamentaliste, la science est en grand partie une réflexion sur le langage.

9.2. SUR LA MECANIQUE QUANTIQUE

Notre conclusion principale en ce qui concerne la mécanique quantique en particulier est que, contrairement à une idée amplement répandue, il n'est pas exact de parler de l'interprétation orthodoxe du formalisme quantique. En effet, s'il existait quelque chose que l'on puisse appeler l'interprétation de Copenhague, ce ne serait que l'intersection des thèses de Bohr et de Heisenberg. Cette intersection ne peut, cependant, être considérée comme une interprétation, car nous avons vu qu'il lui manque certains points fondamentaux.

Nous proposons en conséquence de distinguer entre deux interprétations différentes qui peuvent être considérées comme interprétations orthodoxes de la mécanique quantique, à savoir:

I. "L'interprétation de Bohr".

II. "L'interprétation de Heisenberg".

En ce qui concerne les traités actuels de mécanique quantique ceux qui proposent une interprétation, le font chacun à leur manière. Par conséquent, nous proposons de parler d'une troisième classe d'interprétations qui, du fait qu'on les trouve dans les manuels qui enseignent la mécanique quantique telle qu'elle est employée par ceux qui la pratiquent dans leur recherche, peut également être appelée orthodoxe, et à laquelle nous nous référerons comme:

III. "L'interprétations des manuels".

Nous avons une situation dans laquelle une interprétation d'un algorithme mathématique est supposée exister et être adoptée par l'immense majorité des physiciens, cette interprétation à laquelle le chercheur se réfère lorsque, parfois, il rencontre des problèmes conceptuels en réfléchissant sur le résultat de ses recherches. Néanmoins, ce qui existe, en réalité, ce sont

deux interprétations complètes mais différentes et une série d'autres pour la plupart incomplètes et peu cohérentes.

Cette situation ne peut être qualifiée que par le nom de *confusion* au sens strictement étymologique (On *con - fond* en un amalgame que l'on appelle "interprétation de Copenhague" plusieurs thèses qui ne peuvent pas former un tout cohérent).

Cette situation n'est pas très grave si l'on réduit la science à son côté strictement pragmatique. Dans ce cas, ce qui importe vraiment c'est de pouvoir utiliser l'algorithme quantique comme un outil adéquat de calcul. Nous devons remarquer que la position cohérente, dans ces circonstances, est de soutenir avec Feynman que, s'il existe une interprétation du formalisme, cette interprétation n'est pas l'affaire des scientifiques.

Mais au cas où l'on n'a pas la lucidité d'un Feynman pour soutenir d'une manière totalement consciente et cohérente que la science n'est, en fin de compte, qu'un ensemble de "recettes qui marchent", la situation de confusion déjà mentionnée n'est pas du tout satisfaisante.

L'auteur de la présente Thèse, en tant que physicien, ne voit pas pourquoi une discussion concise mais claire et cohérente des interprétations du formalisme quantique présentées par Bohr et Heisenberg serait incompatible avec l'enseignement des règles de calcul de la mécanique quantique. Cela peut donner à l'apprenti de l'"art du calcul quantique" l'occasion d'avoir une vue claire sur les problèmes conceptuels qui se trouvent derrière l'appareil mathématique tout en lui permettant, soit de choisir consciemment la position de Feynman, soit de réfléchir de manière cohérente sur les problèmes conceptuels en question.

Nous espérons que notre discussion ainsi que les distinctions que nous avons introduites puissent être utiles à ce sujet.

9.3. SUR LA REALITE.

A l'examen des diverses interprétations de la mécanique quantique, nous pouvons dégager deux grandes thèses concernant la réalité:

A. Une thèse soutient que la science ne vise pas la description d'une réalité en soi, mais seulement la description de l'expérience humaine. C'est la thèse exprimée clairement par Bohr et Wheeler et qui semble être l'idée de Heisenberg, lequel n'est pas exempt d'ambiguïté sur ce sujet. Cette thèse, telle que nous l'avons exposée dans les chapitres précédents, est fondée sur des idées précises concernant le langage. A la différence de Bohr, Wheeler essaie de construire une théorie cosmogonique, qui permettrait à la fois de comprendre l'origine du monde et l'existence du quantum d'action sur la base exclusive de l'objectivité faible, en niant l'existence d'une réalité indépendante.

B. Une deuxième thèse considère comme nécessaire l'existence d'une réalité en soi même si celle-ci ne s'inscrit pas dans l'espace et le temps ni ne peut être décrite par le langage dont nous disposons actuellement. Les partisans de cette thèse peuvent avoir diverses opinions sur la relation entre la réalité et le langage.

d'Espagnat, par exemple, soutient l'impuissance du langage et sa conclusion logique est que la réalité est voilée. Cependant, comme il le montre lui-même, la thèse n'implique

pas que la science soit "muette" en ce qui concerne la réalité, de laquelle elle peut parler en négatif en permettant de voir que tel ou tel conception de la réalité n'est pas valable, et en pouvant nous révéler , selon d'Espagnat, les structures générales de la réalité.

D'autres physiciens comme Bohm ne croient pas en l'impuissance du langage. Pour eux, la science doit créer de nouveaux concepts afin de pouvoir décrire la réalité en soi.

Nous voyons donc que les diverses considérations sur la réalité sont étroitement liées à celles sur le langage. Nous ne pouvons rien dire sur la réalité sans, en même temps, émettre des affirmations sur la nature du langage. En ce sens, toute recherche sur la réalité est aussi une recherche sur le langage, que l'on soutienne l'impossibilité de construire une ontologie, ou que l'on vise au contraire à en construire une.

D'une certaine façon, nous ne pouvons pas dire quelles considérations - celles qui on trait à la réalité, ou celles qui se réfèrent au langage - viennent en premier lieu et dans un certain sens, cela nous laisse, comme Bohr l'a exprimé, "suspendus dans le langage."

Nous espérons que notre thèse soit une contribution à une compréhension approfondie du fait que, dans son aspect le plus fondamental, la science n'est rien d'autre qu'un discours sur le réel qui doit se faire sans ambiguïté et est susceptible de nous indiquer si ce réel est nécessairement "pour nous" ou au contraire, s'il peut nous guider sur les traces de la Réalité en Soi.

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

CHAPITRE 1

- BOHR, N; **Physique Atomique et Connaissance Humaine** (Gauthier Villards, Paris, 1957)
- ; "physical Science and the Study of Religions" dans **Studia Orientalia Ionni Pedersen Septuagenario** (Einer Munksgaard, 1953) P.385 - 390
- . **Essays 1958-1962 on Atomic Physics and Human Knowledge**, (Interscience Publishers, New York 1963)
- ; **Atomic Theory and the Description of Nature** (Cambridge University Press, 1934)
- CARNAP, R.; "Empiricism, Semantic and Ontology" dans **Philosophy of Mathematics** Benacerraf, P and Putnam, H, éd. Cambridge University Press, Cambridge 2 éd. 1.985
- EINSTEIN, A; **Ideas and Opinions** (Laurel Edition, Dell Publishing Co., Inc., New York, 1.973)
- d'ESPAGNAT, B; **Une Incertaine Réalité**, (Gauthier-Villars, Paris, 1985)
- ; **Conceptual Foundations of Quantum Mechanics** 2nd. éd. (W.A.Benjamin, Inc. London 1976)
- FOLSE, H.J.; **The philosophy of Niels Bohr**. (North Holland, Amsterdam, Oxford, 1.985)
- PETERSEN, A; The Philosophy of Niels Bohr **Bulletin of the Atomic Scientist** 19, 8-14 (1963)
- . **Quantum Physics and the Philosophical tradition**. (M.I.T. Press, Cambridge MA. 1.968)
- SHIMONY, A; "Physical and Philosophical Issues in the Bohr -Einstein debate" dans **Niels Bohr: Physics and the World** Feshbach, H.; Matsui, T.; Oleson, A.; Ed. (Harwood Académie Publishers, 1988)
- ZINKERNAGEL, P.; **Conditions for Descriptions**. (Routledge & Kegan Paul, London. 1.961)

CHAPITRE 2

- BENECERRAF P.; H. PUTNAM Ed. **Philosophy of Mathematics** (Cambridge University Press, 1985)
- BOHR, N; "Physical Science and the Study of Religion", dans **Studia Orientalia**

Ionni Pedersen Septuagenario (Einer Munksgaard, 1.953) p.385 – 390

-----; "Maxwell and Modern Theoretical Physics". **Nature** Vol. 128, Oct 24 (1931) p. 691

-----; "On the Notions of Causality and Complementarity". **Science**. Vol.111 January 20, 1950 p.51

HEISENBERG, W.; **La Partie et le Tout** (Albin Michel, Paris. 1972)

HOLTON, G.; dans "Les racines de la complémentarité" en **L'imagination scientifique**. (Gallimard, Paris. 1.981)

HONNER, J.; "The Transcendental Philosophy of Niels Bohr", **Studies in History and Philosophy of Science**. Vol 13, No.1 p. 1- 29 1.982

PETERSEN, A. ; "The philosophy of Niels Bohr" **.Bulletin of the Atomic Scientist** 19, 8-14. 1.963

SHIMONY, A; "Physical and Philosophical Issues in the Bohr-Einstein debate" dans **Niels Bohr: Physics and the World** Feshbach, H.; Matsui, T.; Oleson, A.; Ed.(Harwood Académie Publishers, 1988)

WEIZSACHER, C. F. von; dans **Quantum Theory and Beyond**, Ted Bastin , Ed. (Cambridge University press, 1971)

CHAPITRE 3

BOHR, N; "On the constitution of atoms and molecules" Part I **Phil. Mag.** 26, 1913. p.1-25. Part II "Systems containing only a single nucleus". **Phil. Mag.** 26, 1913. p.473-502. Part III "Systems containing several nuclei". **Phil. Mag.** 26. 1913. p. 857-875.

-----; **Physique Atomique et Connaissance Humaine** (Gauthier Villards, Paris, 1957)

-----; **Essays 1958-1962 on Atomic Physics and Human Knowledge**, (Interscience Publishers, New York 1963)

-----; **Atomic Theory and the Description of Nature** (Cambridge University Press, 1934)

-----;"Causality and complementarity" **Philosophy of Science** Vol.4, No. 3, July 1937, p.289-298

----- ;"The Quantum Postulate and the recent development of Atomic Theory", **Supp to Nature** April 14 1.929. p.580-590

----- ; "Physical Science and the Study of Religions" dans **Studia Orientalia Ionni Pedersen Septuagenario** (Einer Munksgaard. 1953) p.385 - 390

d'ESPAGNAT, 8; **Conceptions de la Physique Contemporaine**, (Hermann, Paris, 1965) p.103

FORMAN, P; **Weimar Culture, Causality and Quantum Theory (1918-1927)** Historical Studies

in the Physical Science, (Univ. of Pennsylvania Press, 1971) Vol. 3

HOFFDING, H; **The Problems of Philosophy** (Mac Millan, New York 1905)

-----; **A History of Modern Philosophy** (New York, Dover Publications, 1995) Vol. III

HOLTON, G; " Les Racines de la Complémentarité" dans **L'Imagination Scientifique** , (Gallimard, Paris 1981)

JAMMER, M.; **The Philosophy of Quantum Mechanics** (John Wiley & Sons New York, London, 1947) Chap.7

-----; **Conceptuel Development of Quantum Mechanics** (Mc Graw Hill, New York, 1974)

PATY M.;HOFFMANN, B.; **L'étrange Histoire des Quanta** Editions du Seuil, Paris, 1981) p.220

PETERSEN A; "The Philosophy of Niels Bohr" **Bulletin of the atomic Scientist** 19, 1963 p.8-14

POPPER.K; Préface de: **Le grand débat de la théorie** quantique Selleri, F; (Flammarion, 1986)

New Théories in Physics. Proceeding of the International Conférence:, Warsaw (1938) Institut International de Cooperation Intellectuelle, Paris, (1939).

ROZENTAL, S; Ed.Niels **Bohr, His life and Work as seen by his friends and colleages.** (North-Holland, Amsterdam, 1968.)p.13

SELLERI, F, **Le grand débat de la théorie quantique**,(Flammarion 1986) Chap. 2.

WOOTERS, W.K. and ZUREK, W.H.;"Complementarity in the double-slit experiment: Quantum non-separability and a quantitative statement of Bohr's principles" **Phys. Rev. D** 19, 1.979. p.473 -484

CHAPITRE 4

BOHM, D .; HILEY, B.J.;"An Ontological Basis of the Quantum Theory". **Phys. Rep.** 114 No.6 1.987 p.323 - 375

BOHR N; "Chemistry and the Quantum Theory of Atomic Constitution", Faraday Lecture, Journal of the Chemical Society 1932 p. 349 - 384

-----; **Physique Atomique et Connaissance Humaine** (Gauthier Villards, Paris,1957)

-----; **Essays 1958-1962 on Atomic Physics and Human Knowledge** (Interscience Publishers, New York 1963)

-----; "The Quantum Postulate and the recent development of atomic theory", **Supp. to Nature** April 14, 1.928. p.580-590

-----; **Collected Works**, eds. L. Rosenfeld and J.Rud. Nielsen, (North Holland Publishing Company, Amsterdam, 1985) Vol 6. p. 326-330.

-----;" Causality and Complementarity " **Philosophy of Science** Vol. 4, No.3, July 1937 p.289-298

- DIRAC, P.; **Quantum Mechanics**. (Oxford University Press, Oxford 1958) Fourth Edition
- d'ESPAGNAT, B.; **Conceptual Foundations of Quantum Mechanics**. W. A. Benjamin inc, London 1976
- ; **Conceptions de la Physique contemporaine**. Hermann, Paris. 1965
- EVERETT, H.; "Relative State Formulation of Quantum Mechanics" **Rev. Mod. Phys.** Vol 29 No.3,454-464 July, 1967
- FOLSE, H.J.; **The Philosophy of Niels Bohr** (North Holland, Amsterdam, Oxford 1985
- GHIRARDI,G.C; RIMINIA; WEBER, T.;"Unified microscopic and dynamics for microscopic and macroscopic Systems", **Phys. Rev. D**. Vol. 34, No. 3, 15 July 1986 p. 470-4
- HEISENBERG, W.; **La partie et le tout**. Albin Michel, Paris 1.972. p.148
- HEITLER ,W; **The Quantum Theory of Radiation** (Dover Publications Inc. 3 ed. New York, 1.984)
- HUANG, K.; **Statistical Mechanics** (John Wiley & Son, Inc.,New York. 1.976)
- KOPPMAN B.O; **Proc. Natl. Acad. Sci.** USA 17, 315 - 318 (1931)
- LANDAU,I; LIFSHITZ, E.M.; **Mecanica Cuantica No-Relativista** (Editorial Reverté, S.A., Barcelona, 1972)
- LINDHARD,J.; "Complementarity between energy and temperature" dans *Lessons of quantum Theory, Niels Bohr Centenary Symposium*. Copenhagen, Denamark, 3-7 Oct 1.985. (Amsterdam Netherland's North Holland. 1.986.)
- MISRA, B.; **Proc. Natl. Acad. Sci.** USA 75 1627-1631 (1978)
- ; PRIGOGINE, I. et COURBAGE, M; **Proc. Natl. Acad. Sci.** USA 76, 4768-72 (1979)
- POINCARÉ, H; C.R. **Hebd. Séances Acad. Sci.** 108 1889
- PRIGOGINE, I; **Physique, temps et devenir**. Chap. VII, (Masson, Paris. 1980)
- ; STEINGER, I; **La Nouvelle Alliance** (Gallimard, Paris 1979)
- ; & COURBAGE, M; **Proc. Natl. Acad. Sci.** USA 76, 3607-3611 (1979)
- . **Non-equilibrium Statistical Mechanics** (Wiley Interscience, New York 1962)
- SHIMONY, A;"The rôle of the observer in Quantum Theory **American Journal of Physics** Vol.31, No. 10, October 1963
- WIGNER, E; "Remarks on the Mind-body Questions" in **The Scientist Speculates** (I.J. Good ed. W. Heinemann, London. 1961)

CHAPITRE 5

- ASPECT,A.; DALIBARD J; et ROGER, G; "Experimental Test of Bell Inequalities using times-varying Analyzers" **Phys. Rev. Lett**, Vol 49, No25 De. 1.982

- EBERHERD, P.H.; "Bell's Theorem and the Different concepts of Locality" **Il nuovo Cimento** Vol.46 B, No. 2 11 Agosto 1978
- BOHM, D.; HILEY, B.J."An Ontological Basis for the Quantum Theory" **Phys. Rep.** 114 No.6 1987 p.323 - 375
- COSTA DE BEAUREGARD, O.; **Proc. of Int. Symp. Foundations of Quantum Mechanics.** Tokio 1.983
- EINSTEIN, A.; "Remarks to the Essays appearing in this Collective Volume" dans **Albert Einstein, Philosopher Scientist**, Vol.II P.A. Schilpp ed. (Open court, La Salle, Illinois, 1970)
- . "Autobiographical Notes" dans **Albert Einstein, Philosopher Scientist** Vol I, P.A. Schilpp ed. (Open Court, La Salle Illinois. 1970)
- .; **The principle of Relativity** (Dover Publications Inc. London 1952)
- d'ESPAGNAT, B.: **Une incertaine réalité.** (Gauthiers-villars, Paris 1.985)
- ; "Non-separability and the Tentative Description of Reality" **Phys. Rep.** Vol. 110. No. 4 1.984 p.203 – 264
- EVERETT, H.; "Relative State Formulation of Quantum Mechanics" **Rev. of Mod. Phys.** Vol 29, No.3, July 1.957 p. 454-462
- MERMIN, N.D. "Quantum Mechanics vs. Local realism near the classical limit: A Bell inequality for spins" **Phys. Rev.**Vol.22, No.2, 15 July 1.980
- SHIMONY, A.: "Physical and Philosophical Issues in the Bohr -Einstein Debate" dans **Niels Bohr: Physics and the World** Feshbach, H.; Matsui, T.; Oleson, A.; Ed.(Harwood Academic Publishers,1988)

CHAPITRE 6

- BELL, J.; "Quantum Field Theory without observers, or observables, or measurements, or Systems, or apparatus, or wave function collapse or any thing like that" **Report to Istituto Italiano per gli Studi Filosofici**, Amaldi. 1.984
- BOHM, D. "A suggested interprétation of the quantum theory in terms of 'hidden variables'",Part I, **Phys. Rev.** 85, 1952 p.166-179, Part II **Phys. Rev.** 85 1952 p.180-193
- BOHR, N.;" Can quantum Mechanics description of physical reality be considered complete? **Phys. Rev.** 48, 1.935 p.696-702
- de BROGLIE,L.;"Sur la possibilité de relier les phénomènes d'interférence et la diffraction à la théorie des quanta de lumière" **Comptes Rendus** 183 1926 p.447-448
- ;"La structure de la matière et du rayonnement et la mécanique ondulatoire" **Compte Rendus** 184, 1927.p.273-274
- ;"La mécanique ondulatoire et la structure atomique de la matière et du rayonnement" **Journal de Physique et du radium** 8, 1927, p.225 -244.
- EINSTEIN, A.; PODOLSKI, B.; ROSEN, N."Can Quantum Mechanical Description of physical reality be considered complete?" **Phys. Rev.** 47, 1935 p.777-784.

d'ESPAGNAT, B.; **A la recherche du réel** (Gauthier – Villars, Paris, 1.970).Chap. 12
----- ; **Une incertaine Réalité** (Gauthier – Villars, Paris, 1.985).Chap.
10 Paris. 1.985) Chap.10

HEMPEL, G. ; **Eléments d'Epistémologie.** (Albin Michel, Paris)

JAMMER, M.; **The philosophy of Quantum Mechanics** (John Wiley & son, New
York 1974) p.181-184

KALCKAR, J.;"Niels Bohr and his youngest disciples" dans Rozental, S. Ed. **Niels
Bohr: His life and work as seen by his friends and colleagues** (North
Holland, Amsterdam. 1967) p.234

LEGGET, A.J."Macroscopic Quantum Systems and the Quantum Theory of
Measurement" **Scyp. of the Prog. of Theo. Phys** 69, 1980 p.80-100

PETERSEN A; **Quantum Physics and the Philosophical Tradition** (M.I.T. Press,
Cambridge, Mass 1.968)

SHIMONY, A.; "Physical and Philosophical Issues in the Bohr-Einstein Debate" dans
Niels Bohr:Physics and the World Feshbach, H.; Matsui, T.; Oleson,
A.;Ed.(Harwood Académie Publishers, 1988)

CHAPITRE 7

d'ESPAGNAT, B. **Une Incertaine Réalité** (Gauthier-Villards. Paris. 1985) p. 201

FEYNMAN, R.P.; LEIGHTON, R.B.; SANDS, M.; **The Feynmann Lectures on
Physics**

-----; **Q.E.D. The strange Theory of the Light and Matter.**(Princeton
University Press. Princeton New Jersey, 1985) p.124 (souligné par Feynman
lui-même)

HEISENBERG, W.; **Physique et Philosophie** (Albin Michel, Paris, 1970)

MESSIAH, A.; **Quantum Mechanics** Vol I.(John Wiley & Sons Inc. New York,
London Sydney. 1.968)

SHIMONY,A."Réflexions sur la philosophie de Bohr, Heisenberg et Schrödinger" **Journal de
Physique** Colloque 62, supplément au No.3, Tome 42, Mars 1981, p.c2-91 - c2-95

WIGNER, E. The problem of the Measurement **Am. J. of Phys.** 1963. 6-15

CHAPITRE 8

AHARONOV, Y.; BOHM, D. **Phys. Rev** 115, 1959 p.484. CHAMBERS, R. G.; **Phys. Rev. Letters**
5, 1960 p.3

ANDANAN J.; "Quantum interference and the Classical Limit" **Int. Jour, of Theor. Phys.** Vol.19,
No.7, 1980 p.537-556.

- BOHM, D.; HILEY, J.B. "An Ontological Basis for the Quantum Theory", **Phys. Rep.** 144 No. 6 p.323-375
- ; "A suggested interpretation of the quantum theory in terms of 'hidden variables'", Part I, **Phys. Rev** 1952 p.166-179; Part II **Phys. Rev** 85, 1952 p. 180-193
- ; **Wholeness and the Implicate Order** (Routledge and Kegan Paul, London 1980)
- DIRAC, P.A.M.; "Quantized Singularities in the electromagnetic Fields" **Proc. Roy. Soc** 115, 1931, p.60-72.
- de BROGLIE, L. "Sur la possibilité de relier les phénomènes d'interférence et la diffraction à la théorie des quantas de lumière" **Comptes Rendus** 184 1927 p. 273-274;
- ; "L'Structure de la matière et du rayonnement et la mécanique quantique ondulatoire" **Compte Rendus** 184, 1927 p.273 -274; "La mécanique ondulatoire et la structure atomique de la matière et du rayonnement" **Journal de Physique et du Radium** 8, 1927 p.225-244
- d'ESPAGNAT.B.; **A la recherche du réel** (Gauthier-Villars, Paris,1.981 2e. éd.) p.157
- ; "Empirical Reality, Empirical Causality and the Measurement Problem". **Found. Phys.** 17, 1.987 p. 507
- ; "A la recherche du réel" **Jour. de Phys.** Colloque No.2, Supp au Jour. de Phys. FASC. 3 p.c2-99 - c2-106
- FOLLESDAL, D.; "Meaning and Experience" dans S. Guttenplan, ed. **Mind and Language** (Clarendon Press, Oxford, 1975) p. 254
- MORIYASU, K.; **An elementary Primer for Gauge Theory** (World Scientific Publishing Co. Pte. Ltd., Singapore, 1985)
- SAKURAY, J.J.; **Advanced Quantum Mechanics** (Addison - Wesley Publishing Company, Reading, Massachusetts, 1973) p. 15-18
- WHEELER, J.A.; "Bits, Quanta, Meaning" dans **Caianiello Celebration Volume**, A. Giovanni, M. Marinaro, F. Mancini et A. Rimini, éd.
- WOOTER, W.K.J.; "The acquisition of information from quantum measurement" Ph. D. Dissertation, University of Texas at Austin, 1.980 cité par Wheeler dans Réf. (2)
- WU, T.T.; YANG, C.N. "Concept of nonintegrable phase factors and global formulation of Gauge fields" **Phys. Rev. D** Vol.12, No. 12, 1975 p.3845 - 3857
- YANG,C. N.; **Gauge Fields** Proceedings of the 1975 Hawaii Conférence (University Press of Hawaii)
- ; "Integral formulation for Gauge Fields" **Phys. Rev. Lett** Vol 33, No.7, 1974, p.445-446
- ; MILLS, R.L.; "Conservation of Isotopic Spin and Isotopic Gauge Invariance" **Phys. Rev.** Vol. 96, No.1,1954 p.191-195

CHAPITRE 9

FEYNMAN, R.P.; **Q.E.D. The atrange Theory of Light and Matter.** (Princeton University 1985)

BIBLIOGRAFIE

- BELL, J.S.; **Speakable and unspeakable in the quantum mechanics** (Cambridge University Press, Cambridge, 1987)
- BERGSTEIN, T.; **Quantum Theory and Ordinary Language** Mac Millan, London, 1.972)
- BOHM, D.; **Causality and Change in Modern Physics** (Routledge & Kegan Paul, London, 1967)
- BOHR, N.; "Sur la méthode de correspondance dans la théorie de l'électron", **Septième Conseil de Physique, Institut. Inter. de Physique Solvay** (Paris, 1934)
- ; "Analysis and synthesis in science" **Inter. Encyclopedia of Science**, Vol 1, Ho. 1, 1938
- ; "Le problème causal en physique atomique", **Réunion sur les nouvelles théories de la physique, Varsovie, 1938.** (Paris, 1939)
- "Newton's principles and modern atomic mechanics". **Royal Society Newton Tercentenary Celebration** July 1946 p.56
- ; "On the notions of Causality and Complementarity", **Dialectica** 2, 1948 p.312 - 319
- ; "Mechanical research and natural philosophy", **Acta Medica Scand.** 142 Suppl. 266, 1952, p. 967
- ; "Physical science and man's positions" **Philosophy Today** 1957, p. 65
- ; "Quantum Physics and Biology" Simposia of the Society for Exp. Biology, No. 14 **Models and Analogues in Biology** (Bristol 1960)
- ; "Physical models and living organisms" dans **Light and Life** éd. McElroy Glass (The John Hopkins Press, 1961)
- ; **Collected Works** General Editor Erik Riidinger (North- Holland Publishing Company, Amsterdam; American Elsevier Publishing Company, New York) 9 Vols. parus.
- "Bohr et la complémentarité" **Revue d'histoire des sciences** Tome XXXVIII - 3/4 Juillet- Décembre 1985. Centre International de Synthèse, Centre Alexandre Koyré, Paris
- de BROGLIE, L.; "Sur la complémentarité des idées d'individue et le système," **Dialectica** 2 1948 p.325 - 329
- DESTOUCHES, J.L. "Quelques aspects théoriques de la notion de complémentarité", **Dialectica** 2 1948 p. 351-382
- DESTOUCHES - FEVRIER, P.; "Manifestations et sens de la notion de complémentarité" **Dialectica** 2 1948 p. 383 - 412
- DEWITT, B.S.; GRAHAM, R.N.; "Resources Letter I.Q.M. - 1 on the Interprétation of Quantum Mechanics" **Am. Jour, of Phys.** Vol 39, 1971 P.724 - 738
- d'ESPAGNAT, B.; **Penser la Science** (Bordas, Paris, 1990)

- ; **Un atome de Sagesse** (Editions du Seuil, Paris, 1982)
- ; "Non-separability and some views on Reality" **Philosophy of the Natural Science** Proc. of the 13th Int. Wittgenstein Symposium (Verlag Hôlder, Wien, 1989)
- ; "Matière et Réalité" dans **La matière aujourd'hui** (Editions du Seuil Paris, 1981) p.210 -240
- ;"Réalité et Physique" **Dialectica** Vol. 43, Fasc. 1 - 2 , 1989 p. 157 - 172
- FEYERBEND, P.K.; Me KAY, D.M.; "Complementarity" **Proceeding of the Aristotelian Society** Supp. Vol. 32, p.1958 p.75 -122.
- GONSETH, F.; "Remarque sur l'idée de complémentarité" **Dialectica** **2**, 1948, p.413 - 420
- GRUNBAUM,A.; "Complementarity in Quantum Physics and its Philosophical Generalisation" **The Journal of Philosophy** Vol. LIV, No.23, 1957 p. 713 - 727
- HANSON, N.R.;"Copenhagen Interpretation of Quantum Theory" **Am. Jour, of Phys.** Vol 27, No. 1, 1956 p. 1-15
- HEISENBERG, **W.**;**La nature dans la physique contemporaine**(Gallimard, Paris, 1962)
- ; "Development of Concepts in the History of Quantum Theory" **Am. Jour, of Phys.** 4B, No. 5, 1975
- . **Across de frontier**, (Harper & Row, New York, 1983)
- . **Tradition in Science** (The Seabury Press, New York, 1983)
- The Physical principles of Quantum Theory**(Dover, New York,1949)
- . "The Representation of Nature in contemporary Physics", **Daedalus**, 87, 1958
- HONNER, J.; **The description of Nature: Niels Bohr and the Philosophy of Quantum Physics** (The Clarendon Press, Oxford, 1987)
- t'HOFF,G.; "Les théories de Jauge et les particules élémentaires" **Pour la Science** No.4, 1980
- KIRPS, H.; **The Metaphysics of Quantum Theory** (Clarendon Press, Oxford, 1987)
- LAHTI, P.; MITTELSTAEDT, P.; éd. **Symposium on the foundation of Modern Physics 1987** (World Scientific, Singapore, 1987)
- LALOE, F.; "La Mécanique quantique à l'ordinaire des physiciens." **Fundamenta Scientiae**, Vol 5, No. 1, 1984
- . "La mécanique quantique" dans **Le monde Quantique** (Editions du Seuil, Science et Avenir, Paris, 1984)p. 147 - 158
- MEHRA, J.;RECHENBERG, H.; **The Historical Development of Quantum Theory** (Springer, New York, 1982) 5 Vols. parus
- MURDOCH, D.; **Niels Bohr's Philosophy of Physics** (Cambridge University Press, Cambridge, 1987)

- ORTOLI, S.; PHARABOD J.P.; **Le cantique des quantiques** (Editions la Découverte, Paris, 1984)
- PAULI, W.; Ed. **Niels Bohr and the development of Physics**(Pergamon Press, London, 1955)
- REDHEAD, M.; **Incompleteness, Nonlocality and Realism** (The Clarendon-Press, Oxford, 1987)
- REDHEAD, M.L.G.; "Whither complementarity?" dans N. Rescher (ed.) **Scientific Inquiry in Philosophical Perspective** (University Press of America, Lanham, 1987) p.169 -182
- ROSENFELD, L.; "Niels Bohr", **Nucl, Phys.** **41** 1.963 p.1-12
- SCHEIBE, E.; **The Logical Analysis of quantum Mechanics** Chap 1 (Pergamon Oxford, 1973)
- STAPP, H.P. "The Copenhagen Interpretation", **Am. Jour. of Phys** Vol 40, 1972 p. 1098 -1116
- VIIRI, J.; LATHI, P.; LAURIKAINEN, K; Ed. **Symposium on the Foundations of Modern Physics, Discussion Section** (Report Series, Turku, Finl, 1-45)
- VAN DER WAERDEN, B.L.; Ed. **Sources of Quantum Mechanics**(North Holland Publishing Company, Amsterdam, 1967)
- WHEELER, J.A.; ZUREK, W.H. (Eds) **Quantum Theory and Measurement** (Princeton University Press, Princeton, 1983)