UNIVERSITE D'ABOMEY-CALAVI (UAC)

==*=*=*

FACULTES DES SCIENCES HUMAINES ET SOCIALES (FASHS)

==*=*=*

DEPARTEMENT DE PHILOSOPHIE (DPH)

==*=*=*

MEMOIRE DE LICENCE

==*=*=*

Le statut de la réalité dans *Le grand roman de la physique quantique* de Manjit KUMAR

Présenté par :

Samwilou OUGNERO

Sous la direction de :

Désiré MEDEGNON
Maître de conférences

***Année académique* : 2022-2023**

À

- Ma mère, Satou KABOURA, pour qui mon attachement est si grand ; ce travail est aussi le sien.
- Mon père, Salif OUGNERO, dont l'éducation m'a positivement façonné.
- Mon frère, Alimi OUGNERO, pour avoir financé mes études et pour son sens élevé de la fraternité.

REMERCIEMENTS

Que l'on nous permette de payer ici notre redevance de gratitude envers tous ceux qui ont contribué d'une manière ou d'une autre à la réalisation de ce travail.

Nos remerciements sont expressément adressés à :

- monsieur Désiré MEDEGNON, pour avoir accepté de diriger ce mémoire et dont les orientations ont rendu la réalisation de ce travail commode, malgré ses multiples occupations, qu'il trouve ici le fruit de la sollicitude constante et des conseils judicieux dont il nous a gratifié.
- Aux membres du jury, pour avoir accepté de siéger pour l'examination de ce mémoire, malgré leurs multiples occupations.
- tout le personnel enseignant du département de philosophie, pour avoir contribué à notre formation malgré les conditions de travail difficiles.
- mes oncles et tantes Abdoul KABOURA, Issiaka KABOURA, Tabarou OUGNERO, pour leur sens de fraternité et de leur conseil.
- mon aîné Clément KPERA, pour m'avoir inculqué l'amour de la lecture des œuvres philosophiques et surtout d'avoir accepté de lire ce mémoire
- monsieur Ousmane IDRISSOU et son épouse Nadiath CISSE pour leurs multiples soutiens.
- mon ami, Noël NATO, licencié en Physique Chimie pour avoir accepté de débattre avec moi sur les formules et équations physiques.
- mes professeurs du secondaire, Thomas AGOSSOU, Lucien GAGNI et Olivier B.L. HOUDOHOUE qui m'ont insufflé depuis le secondaire le goût de la philosophie.
- mes frères et amis David SAWE, Djibrila SAKA SIRA, Marzouk CISSE, Oscar KADI, Souleyman ABDOULAYE, Rosemonde OLAYE, Josué OLAYE, Osséni CHABI SARA , Raïmi GOBI,
- OROU Daouda, artisans de l'ombre de ce travail et tous ceux qui, de loin ou de près, ont contribué à notre éducation, surtout à la réalisation de ce mémoire, nous manifestons notre gratitude

SOMMAIRE

SOMMAIRE 4
RÉSUMÉ 5
ASTRACT 5
CHAPITRE I : GENERALITES SUR LA PHYSIQUE 8
CHAPITRE II : LA REALITE DANS LA PHYSIQUE QUANTIQUE ET LES PROBLEMES ÈPISTEMOLOGIQUES LIES AUX CONTROVERS DE LA NATURE DE LA REALITE PHYSIQUE. 18
CHAPITRE III : PORTEE DES THEORIES DE LA PHYSIQUE QUANTIQUE ET L'AVENIR DE LA SCIENCE. 45
CONCLUSION 53
FERERENCES BIBLIOGRAPHIQUES 55
TABLE DES MATIERES 57

RÉSUMÉ

Quelle est la place qu'occupe la réalité en physique quantique ? Tel est le problème fondamental dont ce mémoire se propose de rendre compte à travers l'œuvre de Kumar dont le titre est : *Le grand roman de la physique quantique*. Physicien et philosophe indien, Kumar, dans *le grand roman de la physique quantique* s'est évertué à présenter les différentes thèses des diverses écoles scientifiques qui s'affrontent autour du débat de la réalité physique en physique quantique. C'est ainsi pour les réalistes, la réalité est indépendante de l'observateur ou du sujet. Par contre, chez les phénoménologues, la réalité dépend de l'observateur ou du sujet, elle est subjective ou anthropomorphique. Des lors, on a constaté la remise en cause des piliers fondamentaux des réalistes (déterminisme et objectivité). Toutefois, ceux-ci sont remplacés par (l'indéterminisme ou l'inconnaissable et subjectivité) chez les phénoménologues. Malgré ces oppositions cruciales, la réalité quantique a permis à la physique en particulier et à la science en général, de s'inscrire dans une vision plus ambitieuse de la science, même si, le débat sur la nature de la réalité en physique quantique est devenue source d'inspiration des épistémologues du XXème et XXIème siècle.

Mots-clés : Réalité, physique quantique, déterminisme, objectivité, indéterminisme, subjectivité, anthropomorphique, Réaliste, phénoménologue.

ASTRACT

What is the place of reality in quantum physics? Such is the fundamental problem which this thesis proposes to account for through the work of Kumar whose title is: the great novel of quantum physics has striven to present the different theses of the various scientific schools that clash around the debate of physical reality in quantum physics. It is thus for the realists, reality exists independently of the observer or the subject. On the other hand, among phenomenologists, reality exists depending on the observer or the subject, it is subjective or anthropomorphic. Since then, we have seen the questioning of the fundamental pillars of realists (determinism or objectivity). However, these are replaced by (indeterminism or the unknowledgeable and subjectivity) among phenomenologists. But, despite these crucial oppositions, quantum reality has allowed physics in particular and science in general to be part of a more ambitious vision of science, even if the debate on the nature of reality in physics quantum has become a source of inspiration for 20th and 21st centuries epistemologists.

Keywords: Reality, quantum physics, determinism, objectivity ,indeterminism,subjectivity, anthropomorphic, Realist, phenomenologist.

INTRODUCTION

La notion de réalité en physique quantique est un terme à polémique qui a semé la discorde entre les épistémologues. La conception de la réalité dépend des écoles selon qu'on est réaliste ou phénoménologue. Pour les réalistes tels qu'Einstein, Podolsky et Rosen, la réalité existe indépendamment non seulement du sujet mais aussi de toute théorie élaborée. A titre d'exemple, la lune, la chaise existent indépendamment de l'observateur. C'est ainsi qu'ils affirment :

> Tout examen sérieux d'une théorie physique doit tenir compte de la distinction entre la réalité objective, qui est indépendante de toute théorie, et les concepts physiques avec lesquels opère cette théorie. Ces concepts sont élaborés pour correspondre à la réalité objective, et c'est au moyen de ces concepts que nous nous représentons cette réalité.[1]

C'est ainsi qu'EPR adoptèrent ce qu'ils estimaient être un critère « suffisant » et « raisonnable » pour désigner « un élément de réalité ». Ils soutenaient que, pour qu'une théorie soit complète il fallait qu'il y ait une correspondance univoque entre un élément de la théorie et un élément de la réalité. S'il existait un élément de la réalité physique dont la théorie ne rendait pas compte, alors la théorie était incomplète ; par conséquent, concluent Einstein, Podolsky et Rosen, la description de la réalité physique donnée par la mécanique quantique est incomplète[2]. Toutefois, pour ceux de l'école de Copenhague, c'est-à-dire les phénoménologues, la réalité n'existe pas en dehors du sujet pour la concevoir, elle dépend donc du sujet. Il en va de même pour Bohr, Heisenberg, Pauli, Dirac qui estiment que la réalité, c'est l'observateur qui l'affirme. Elle n'est pas une émanation de toute théorie. Bohr en fut réduit à affirmer que les preuves fournies par Einstein de l'incomplétude de la physique quantique n'étaient pas fortes pour soutenir le poids de pareille assertion. Bohr espérait exploiter ce qu'il décrivait comme une ambigüité essentielle du critère de réalité lorsqu'il s'applique au phénomène quantique en revenant publiquement sur l'affirmation qu'une mesure conduisait à une perturbation physique inévitable[3]. Considérant toutes ces thèses de ces différentes écoles, pour ce présent travail, on pourrait se poser un certain nombre de questions à savoir : En quoi consiste la physique ? Quelle est la place qu'occupe la réalité dans *Le grand roman de*

[1] EPR cité par Manjit KUMAR, *Le grand roman de la physique quantique*, Paris, Editions Jean-Claude Lattès, 2011,p.364.
[2] Manjit KUMAR, *ibid*,p.364.
[3] Manjit KUMAR, *ibid*, p. 370.

la physique quantique de KUMAR ? Quelles sont les répercussions de la physique contemporaine dans la connaissance du réel ? Ces questions de par leur portée didactique et pédagogique trouvent un intérêt éducatif ou instructif d'autant plus que nous savons que la question de la réalité en physique quantique est toujours d'actualité.

Notre but poursuivi dans ce travail est de montrer que l'idée de réalité en physique est relative. C'est un terme à polémique. Présenter les différentes écoles épistémologiques qui s'opposent autour de la perception de la réalité en physique quantique. Exposer les paradigmes scientifiques dus à la physique contemporaine. C'est pourquoi, on se demande peut-être si ce qu'on croirait réel ne le serait plus aujourd'hui, les différentes écoles épistémologiques ou scientifiques (réaliste et phénoménologue) du XIX^{ème} jusqu'à nos jours s'opposeraient sur ce qu'on pourrait considérer comme réalité physique et la réalité quantique aurait changé notre façon d'appréhender les phénomènes de la nature.

Pour ce faire, nous nous sommes donné pour tâche d'organiser le travail en trois grands chapitres essentiels. C'est ainsi que dans le premier chapitre du travail, nous nous proposerons de présenter la généralité sur la physique. Nous allons ensuite consacrer le deuxième chapitre à l'analyse de la réalité dans la physique quantique et les problèmes épistémologiques liés aux controverses de la nature de la physique et la portée des théories de la physique quantique puis présenter dans le même chapitre l'avenir de la science.

CHAPITRE I : GENERALITES SUR LA PHYSIQUE

1–1- De la notion de réalité.

La réalité nous paraît comme le produit d'une recherche. C'est d'abord une notion polyvalente, qu'on emploie dans plusieurs domaines tels que : la politique, la religion, la science**.** C'est ainsi qu'on parle de la réalité politique, de la réalité religieuse, de la réalité scientifique. Mais à l'ordinaire, la réalité est souvent confondue avec la vérité ; au point que, est vrai, tout ce qui se présente à nos sens : tel est sans doute le point de vue des empiristes et matérialistes sur la notion de vérité. Autrement dit, la réalité et la vérité sont intimement liées. De nombreux philosophes, pour rendre compte du décalage entre la façon dont la réalité apparait et ce qu'elle est véritablement, semblent confondre, à l'instar du sens commun, vérité et réalité. Selon les anciens, tel que Platon, pour connaitre le réel, il fallait s'élever au-dessus des apparences et par l'exercice de la contemplation, accéder à la connaissance vraie des essences. Cependant, la physique moderne a grandement contribué à renverser cette perspective, elle fit le pari que nous disposons pour ce qui concerne l'essence des choses, d'un mode de connaissance capable de nous livrer des vérités rationnelles, susceptibles de s'imposer à tout esprit[4]. Si ce siècle est aussi celui des premières conquêtes de la science moderne, c'est que par ailleurs on prend au sérieux le « décalage » entre l'être et le paraitre : on l'analyse, on pose en termes de méthode le problème des conditions de la recherche de la vérité. Le réel est ce que nous subissons, ce qui nous résiste, ce avec quoi il faut compter. La réalité, c'est donc l'ensemble des « objets » qui s'offrent à la connaissance d'un sujet, sous des apparences qu'il faut « rectifier » pour trouver la vérité. Et ce mode de connaissance exacte et idéal, ce ne sont pas l'observation du monde, la contemplation qui le prescrivent, les livres existants, les théories enseignées : ce sont les mathématiques qui permettent de formuler des lois qui seront ensuite validées ou invalidées par des expériences spécifiques. Bien sûr, ces choses ne furent pas comprises en un jour. Il y eut plusieurs étapes cruciales. Ainsi, selon les tous premiers créateurs de la physique moderne, Galilée, Descartes, toute description du monde physique devait être formulée au moyen des seuls concepts de position, figure et mouvement. Ces concepts « clairs et distincts » que l'auteur du *Discours de la méthode* considérait

[4] Etienne KLEIN, *matière à contredire*, 2018, Paris, Flammarion, 2019, p .144.

d'ailleurs comme innés nous sont en tout cas devenus de familières façons d'envisager et d'évoquer la plupart des objets physiques[5].Or la mécanique classique a ainsi intronisé par ce que Bernard d'Espagnat a baptisé « l'einsteinisme » qui consiste en l'idée que la réalité est structurée, qu'elle n'est pas atteignable au moyen des seuls concepts familiers mais que cependant « grâce aux mathématiques qui fournissent les bons concepts, elles sont connaissables et intelligibles».[6] Comme beaucoup d'autres physiciens, Einstein, s'émerveillait de la capacité qu'ont les mathématiques à mordre si efficacement sur la réalité physique. On ne saurait parler de la réalité surtout en physique quantique sans aborder les mathématiques. Elles restent une science dotée d'une extrême exigence de rigueur[7]. On le sait, la plupart des grandes réalisations scientifiques et technologiques de nos jours comprennent une dose, petite ou immense, de mathématique. Cette dose marque la puissance du raisonnement pour dominer la matière et le monde réel, une puissance si grande que certains estiment que la réalité doit être avant tout une construction mathématique et abstraite .[8] On en fait l'expérience tous les jours, toutes sortes de réalisations n'existeraient pas sans mathématique. Etant partout autour de nous, comme les tables et le mobilier, la mathématique est envahissante par son omniprésence dans la nature comme dans la technologie ; mais elle sait se faire oublier quand elle fonctionne bien[9]. En un sens, la mathématique est la science des règles et de ce que l'on peut en déduire. Sa fierté est de travailler avec aussi peu de règles et de postulats que possible ; mais sa contrainte première est d'imposer un raisonnement parfaitement logique, et c'est une contrainte extraordinaire. Sa grandeur est de parvenir, avec aussi peu d'ingrédients et tant de contraintes, à des énoncés si nombreux et si inventifs[10]. Et s'il y a une science dans laquelle le langage est important, c'est bien la mathématique. La mathématique est un langage, et c'est même le langage par excellence des sciences exactes. Le monde serait en quelque sorte un écho physique dégradé de la pureté mathématique qui le tiendrait sous sa coupe. Mais si tel est le cas, comment le monde des équations parvient-il à structurer « à distance » le

[5] Etienne KLEIN, *ibid*, P.140.
[6] Etienne KLEIN, *ibid*. P.147.
[7] Cédric Villani, *Les mathématiques sont la poésie des sciences*, Paris, Flammarion, 2018, p.13.
[8] Cédric Villani, *ibid*, P.14.
[9] Cédric Villani, *ibid*, P.15.
[10] Cédric Villani, *ibid*, P.23.

monde des phénomènes ?[11] Les physiciens, sans avoir forcément le même degré de rigueur que les mathématiciens, utilisent le formalisme de ceux-ci pour communiquer et traduire leurs découvertes. Utilisée partout, la mathématique est devenue une langue universelle, l'une des très rares langues universelles actuelles. On découvre ainsi des relations entre des concepts développés par des personnes différentes, souvent formulées différemment. Cette mise en commun est à la base de nombreux progrès en mathématique et de réalisations célèbres ; elle éclaire toutes les parties prenantes, et permet parfois de résoudre des problèmes de façon spectaculaire. « Faire des mathématiques, disait Henri Poincaré, c'est donner le même nom à deux choses différentes. »[12] Pourquoi cela se produirait-il plus en mathématique que dans d'autres sciences ? Peut-être parce que les mathématiciens travaillent sur de l'abstrait, et que cette abstraction conceptuelle est souvent inhérente à plusieurs phénomènes[13]. La chose la plus incroyable du monde, disait Einstein, c'est que le monde soit compréhensible … De fait, on peut en recréer les manifestations au moyen de quelques formules et équations mathématiques[14]. De plus, en mathématique, inventer, c'est discerner, c'est choisir. Comment doit se faire ce choix ; les faits mathématiques dignes d'être étudiés, ce sont ceux qui, par leur analogie avec d'autres faits sont susceptibles de nous conduire à la connaissance d'une loi mathématique, de la même façon que les faits expérimentaux nous conduisent à la connaissance d'une loi physique.[15] Au-delà de notre raisonnement la réalité à laquelle nous faisons allusion, est aussi celle qui s'applique à l'intérieur de l'atome. De quoi il s'agit en réalité ? Evoquant le vide, plus exactement les divers vides plus ou moins pleins de l'Antiquité, nous ne pouvons guère passer sous silence la doctrine des premiers atomistes, pour lesquels « il n'y a que des atomes et du vide .»[16] Leucippe, Démocrite, Epicure et puis, plus tard, Lucrèce ont fait de ce postulat le fondement de leur conception du monde : « le vide n'existe pas moins que les corps ».[17] Ce vide, leur vide, est à la fois incorporel et illimité, et les atomes (qui ne contiennent rien d'autre que leur propre substance, pas même… du vide) se déplacent en son sein.[18]

[11] Etienne KLEIN, *ibid*, P.115.
[12] Cedric VILLANI, *ibid*, P.37.
[13] Cedric VILLANI, *ibid*, P. 37.
[14] Cedric VILLANI, *ibid*, P.42
[15] Cedric VILLANI, *ibid, P.* 96.
[16] Etienne KLEIN, *ibid*, P.77.
[17] Etienne KLEIN, *ibid ,P.70.*
[18] Etienne KLEIN, *ibid*, P.77.

Au cours des années 1920, la physique quantique se mettait sur pied, afin de rendre compte du comportement bizarre (au regard des lois de la physique classique) des atomes et des particules. Des concepts radicalement neufs furent là inventés, qui conduisirent les physiciens à penser autrement la matière et ses interactions. Au bout du compte, une décennie d'effervescence créatrice et d'intense labeur aura suffi pour qu'un petit nombre d'entre eux, tous jeunes, dispersés aux quatre coins de l'Europe, fondent l'une des plus belles constructions intellectuelles de tous les temps. Mais pour devenir opératoire, l'édifice théorique qui fut ainsi mis sur pied exigeait aussi un travail d'interprétation, qu'ils eurent les pires difficultés à mener à bien. Il faut dire que cette « poésie sophistiquée » qu'est la physique quantique posait des questions à la fois inédites et vertigineuses : Comment comprendre son formalisme ? Comment celui-ci se relie-t-il aux expériences ? Selon quelles règles l'utiliser ? Quel statut conférer au hasard qui intervient dans la détermination des résultats de mesure ? Quels types de discours sur la réalité cette nouvelle physique autorise-t-elle ?[19]

1-2- Perception de la réalité en physique classique.

La physique newtonienne ou la physique classique repose sur deux piliers fondamentaux : l'objectivité et le déterminisme. La physique classique est description appliquée à toute physique non quantique telle que l'électromagnétisme et la thermodynamique. Bien que la théorie einsteinienne de la relativité générale soit considérée par les physiciens comme relevant de la physique « moderne » du XX^{ème} siècle, c'est néanmoins une théorie classique.

En physique classique, est observable toute variable d'un système ou d'un objet qui peut en principe être mesurée. Par exemple, la position, la quantité du mouvement et de l'énergie cinétique d'un électron sont toutes des observables. L'objectivité scientifique occupe une place prépondérante, elle stipule que la réalité ou l'objet existe indépendamment de l'observateur.[20]Selon ce principe, l'objet de nos représentations existe indépendamment de nous. D'où le concept de réalité ‘'indépendante de l'observateur. Ce concept est fondamental ; et de l'avis de nombre de physiciens, il donne vraiment un sens à la recherche. En science, l'objectivité occupe la première place

[19] Etienne KLEIN, *ibid*,148.
[20] Désiré MEDEGNON, 1992-1993, « la théorie des quanta et la ruine du déterminisme scientifique », mémoire de maitrise soutenu sous la direction de : François C. DOSSOU, non publié, UAC, Bénin p.6.

dans l'élaboration d'une théorie. Pour les réalistes aucune science au sens strict du terme n'est valable sans l'observation. C'est le tout premier critère de la physique classique dite newtonienne. C'est ce que Einstein nous fait comprendre à travers son affirmation : « ce que nous appelons science, dit un jour Einstein n'a qu'un seul but : déterminer ce qui est.»[21] A son avis, la physique était une tentative pour saisir la réalité, telle qu'elle est indépendante de l'observation. C'est en ce sens dit- il, qu'on parle de réalité physique. Pour Einstein la croyance en l'existence d'une réalité indépendante de l'observateur était essentielle pour l'exercice de la science. C'est le lieu de souligner que les concepts sont élaborés en fonction de la réalité à observer qui existe bien indépendamment d'un quelconque observateur, pour tenir compte de cette correspondance, un article a été rédigé par Einstein, Podolsky et Rosen qui dit ceci :

> Tout examen sérieux d'une théorie physique doit tenir compte de la distinction entre la réalité objective qui est indépendante de toute théorie, et les concepts physiques avec lesquels opère cette théorie. Ces concepts sont élaborés pour correspondre à la réalité objective et c'est au moyen de ces concepts que nous nous représentons cette réalité. [22]

Tout scientifique qui veut observer un phénomène doit faire taire toute sorte de perception, pressentiments en vue de dire la réalité telle qu'elle est. « C'est un principe de la physique que de supposer l'existence d'un monde réel indépendamment de tout acte de perception, disait Einstein. Mais nous ne le savons pas».[23] Réaliste dans sa philosophie, Einstein savait que pareille position ne pouvait être justifiée. C'était « une croyance » concernant la réalité qui n'était pas démontrable. Quoi qu'il en soit pour Einstein, « c'est l'existence et la réalité que l'on désire appréhender ».[24] Heisenberg comprenait qu'Einstein et Schrödinger veulent « revenir au concept de réalité de la physique classique ou, pour utiliser un terme philosophique plus général à l'ontologie du matérialisme ».[25] La croyance en un « monde réel objectif dont les parties les plus petites existent objectivement dans le même sens ou les pierres ou les arbres

[21] Manjit KUMAR, *ibid*, P.320.
[22] Manjit KUMAR, *ibid*, P.364.
[23] Manjit KUMAR, *ibid*, P.383.
[24] Manjit KUMAR, *ibid*, P. 383.
[25] Manjit KUMAR, *ibid* P.381.

existent, que nous soyons en train de les observer ou non ».[26] De plus, l'objectivité, c'est le fait que les objets existent indépendamment du sujet qui les observe. Les arbres, le ciel et tout ce qui nous environne, toutes les réalités du monde qui enserre existent, préexistent à notre observation : « Tournons-leur le dos, ils continueront d'exister », affirme Heinz. Mais l'objectivité, c'est aussi le fait que nos représentations ou la perception que nous avons des objets, traduise fidèlement ce qui est. Il est vrai que pour appréhender les objets avec fidélité, il nous faut, dans l'esprit de la physique newtonienne les mesurer. Il est tout aussi vrai que cette mesure peut engendrer des perturbations, mais ces perturbations sont prévisibles et non contournables. Ceci signifie que dans le cadre de la physique, le rôle du savant est d'en restituer l'image fidèle par une mesure exacte telle était la conception de l'objectivité des réalistes. « Le point de départ d'Einstein est plus réaliste que déterministe »[27] expliqua Pauli, Pauli voulait dire qu'Einstein présumait que les électrons par exemple possèdent des propriétés préexistantes à tout acte de mesure. Einstein ne voulait à grand jamais renoncer à la représentation d'une réalité conçue comme indépendante de l'observation.[28] C'est ainsi que le réalisme est le point de vue philosophique qui affirme la réalité d'un monde extérieur à l'observateur. Pour les réalistes tels que Albert Einstein, Max Planck, Louis de Broglie, Erwin Schrödinger, la lune, la chaise, la pierre existe même quand personne ne les regarde. D'emblée, l'objectivité est l'un des principes phares de la physique classique en particulier et de la science en général. Mais, la physique classique ou la science sans le déterminisme est incomplète ou inachevée, d'où le déterminisme est le deuxième pilier de la physique classique. Il s'utilise dans plusieurs domaines. C'est une notion qui est employée dans le domaine scientifique, religieux et métaphysique. Karl Popper nous en parle suffisamment : « L'idée fondamentale du déterminisme se laisse exprimer par l'image de la « pellicule cinématographique ».[29] Le futur y est fixé au même titre que le passé ; le spectateur ne fait que découvrir ce qui est déterminé

[26] Manjit KUMAR, *ibid*, P.383.
[27] Manjit KUMAR, *ibid*, P.420.
[28] Manjit KUMAR, *ibid*, P.420.
[29] Lydia JAEGER « l'univers irrésolu, plaidoyer pour l'indéterminisme autour de la lecture de Karl POPPER » in *fac Réflexion*, n°48,1984, P.5.

d'avance. Alors que le déterminisme religieux s'appuie sur l'omniscience et la toute-puissance de Dieu, le déterminisme « scientifique » se présente historiquement comme son pendant sécularisé, les lois de la nature prenant la place de la prédestination divine. Dans la mesure où la science est une entreprise humaine.

> [30]Le déterminisme Scientifique est la doctrine selon laquelle la structure du monde est telle que tout évènement peut être rationnellement prédit, au degré de précision voulu, à condition qu'une description suffisamment précise des évènements passés, ainsi que toutes les lois de la nature nous soit donnée.

Le déterminisme newtonien confère à la physique le pouvoir de prédire les phénomènes à partir de leurs lois d'apparition. On peut donc caractériser le déterminisme Newtonien par cette équation : Déterminisme = Loi + Prédictibilité. C'est ce que traduit bien Karl POPPER. [31] Cette vision du déterminisme qui cadre bien avec la physique newtonienne a remporté beaucoup de succès. Ainsi est-on arrivé par exemple à prédire les éclipses solaires, à prédire la date d'apparition des comètes (la comète de Halley …) on le voit aisément, la physique newtonienne, avec le déterminisme, offrait à l'humanité, l'occasion de « se rendre … maitre et possesseur de la nature » (selon le projet cartésien de la science, exposé dans le *discours de la méthode*). Quant au déterminisme métaphysique n'affirme que le caractère immuable de tous les évènements du monde sans exiger une connaissance ou une prévisibilité quelconque. Il constitue une hypothèse indétectable empiriquement (mais non dénuée de sens insiste Popper), « ne contenant que ce qui est commun aux diverses conditions déterministes ». A cet effet, l'intérêt pour nous, porte sur le déterminisme « scientifique » car, c'est à partir de celui-ci que, le plus souvent, une vision du monde déterministe est soutenue ou rejetée aux temps modernes[32]. En effet, le déterminisme scientifique est un peu l'expression de la mainmise de l'homme sur les phénomènes qui se produisent au tour de lui. Il suffit d'avoir une connaissance précise donc mathématique des données du monde présent et de connaitre les lois qui gouvernent les phénomènes pour prédire les évènements ou, ce qui revient même, calculer à l'avance l'état du monde. En raison de la solidité théorique et de la fécondité technologique des

[30] Karl POPPER*, l'univers irrésolu, plaidoyer pour un indéterminisme*, Paris, Hermann, 1984, p.1
[31] Désiré MEDEGNON, 1992-1993, « la théorie des quanta et la ruine du déterminisme scientifique », mémoire de maitrise soutenu sous la direction de : François C. DOSSOU, non publié, UAC, Bénin p.8.
[32] Lydia JAEGER, « L'univers irrésolu-plaidoyer pour l'indéterminisme autour de la lecture d'un livre de Karl Popper »in *fac-réflexion*, no : 48, 1984, p.6.

lois qu'elle a établies, la physique déterministe de Newton est devenue modèle pour toutes les sciences qui sont constituées après elle, aussi bien les sciences de la matière que les sciences de l'homme :

> Le succès écrasant de la physique newtonienne eut pour résultat pratiquement inévitable que l'on considéra ses caractéristiques comme essentielles à l'édification de la science comme telle, de n'importe quelle science ; toutes les sciences nouvelles qui apparurent au XVIIIème siècle -sciences de l'homme et de la société – essayèrent de se conformer au modèle newtonien.[33]

De plus, Karl Popper nous apprend que « le déterminisme scientifique exige que l'on puisse prédire un évènement avec n'importe quel degré de précision, ce qui dépasse certainement l'idée universelle du sens commun. »[34] Pour finir, il faut avouer que le concept du déterminisme fait allusion à tout ce qui est possible, certain et non à ce qui est probable, du hasard. L'univers newtonien est purement déterministe et ne laisse aucune place au hasard. En physique classique, une particule possède à un instant donné une quantité de mouvement et une position définies. Les forces qui agissent sur la particule déterminent la manière dont sa quantité de mouvement et position varient avec le temps. Ce n'est pas une notion du pourquoi pas ni de l'indétermination : l'idée de la prédiction fait appel à la mesure, a un univers calculé avec certitude. Le déterminisme est un modèle scientifique par excellence. Par exemple, le choix de Poincaré formate les étudiants à penser que « le déterminisme de la physique classique est le modèle scientifique par excellence, alors que le choix que je suggère permet aux étudiants de comprendre que le déterminisme est davantage un choix philosophique qu'un fait d'expérience».[35] De plus, Claude Bernard philosophe et biologiste déclare : « les conditions d'un phénomène une fois connues et remplies, le phénomène se produit toujours et nécessairement. La négation de cette proposition n'est rien autre chose que la négation de la science elle-même. »[36] En effet, on comprend aisément ici, selon, Bernard, que le déterminisme constitue le socle de toute science, le déterminisme est un modèle par excellence dans l'élaboration d'une véritable science .C 'est la condition nécessaire de toute science .Autrement dit, pas de déterminisme, pas de science.

---

[33] Alexandre KOYRE, *ibid*, P.39

[34]Karl POPPER*, L'univers irrésolu, plaidoyer pour un indéterminisme*, Paris, Hermann, 1984, P.9

[35] Jean-Pierre PHARABOD, Gérard KLEIN. *Heurs et malheurs de la physique quantique*, Paris, Odile Jacob, 2017, p.9

[36] Claude BERNARD*, Introduction à l'étude de la médecine expérimentale*, Paris, Flammarion, 1966, p.109

La physique classique, base de toute science, serait une conséquence positive de la célèbre formule de Descartes : « la science a rendu l'homme comme maître et possesseur de la nature. »[37] Le message du père de la philosophie moderne est très claire et net, pour lui, par l'usage de la science, l'homme a su maitriser ou dominer la nature, la nature n'est plus un habitacle des divinités comme le concevaient les sociétés traditionnelles africaines mais une condition ou un atout nécessaire que l'on exploitera à son profit pour satisfaire ses besoins et surtout à la jouissance de sa liberté. En outre, On peut affirmer avec raison que l'homme aurait remplacé Dieu car, en mettant en applications les pierres angulaires (objectivité et déterminisme) de la physique classique, il serait en mesure de prédire avec précision tout ce qui arrivera. En effet, une fois l'œuvre de création accomplie, le Dieu de Newton comme celui de Descartes pouvait se reposer, ce Dieu n'avait plus rien à faire dans le monde. Revenons à la nature, à notre propre nature, vivons et agissons selon ses lois. Mais qu'est-ce donc que la nature humaine ? Comment la déterminer ? Pas en empruntant sa définition aux philosophes grecs ou scolastiques. Ni même aux modernes, tels que Descartes ou Hobbes. Nous devons procéder selon le modèle de newton, en appliquant les règles qu'il nous a données. Nous devons découvrir par l'observation, par l'expérience et même par l'expérimentation les facultés fondamentales et permanentes, les propriétés de l'être et du caractère de l'homme que l'on ne peut ni augmenter ni diminuer, nous devons découvrir les schèmes de l'action ou les lois du comportement qui se rapportent les unes aux autres et lient ensemble les atomes humains. A partir de ces lois, nous pouvons découvrir tout le reste. Ce succès écrasant de la physique newtonienne eut pour résultat pratiquement inévitable que l'on considéra ses caractéristiques comme essentielles à l'édification de la science comme telle, de n'importe quelle science : toutes les sciences nouvelles qui apparurent au XVIII siècle, sciences de l'homme et de la société essayèrent de se conformer au modèle Newtonien de la connaissance emperico-deductive et de s'en tenir aux lois formulées par Newton dans ses célèbres *Regulae philosophandi*[i][38]. En effet, la physique newtonienne ou classique reconnait deux modes d'existence de la matière : le corpuscule et l'onde. Le corpuscule occupe un point précis de l'espace à un moment précis : il a, à chaque instant une position et possède une

[37] Réné DESCARTES, *Discours de la méthode*, Paris, (epub), 2011, P.37.
[38] Alexandre KOYRE, *ibid*, P.38.

vitesse. Un exemple : le morceau de craie à l'opposé de l'onde occupe tout l'espace et ne peut donc être située à un point précis. Un exemple : le son que j'émets lorsque je parle ou lorsque je chante. Avec les entités microphysiques, cette distinction n'est simple à établir. On ne peut se prononcer avec assurance et précision sur la nature des dites entités. Le fait est qu'on ne peut pas les observer à l'œil nu. C'est cet aspect de la physique classique qui aurait amené les physiciens tels que Max Planck, Albert Einstein, Niels Bohr, Heisenberg, Dirac et Pauli à envisager une autre théorie pour pouvoir expliquer cet aspect de la physique. En résumé , il faudrait retenir que les théories de la physique newtonienne se sont développées en admettant la réalité du monde physique et en cherchant à en donner une description, puis à en suivre l'évolution en se servant toujours du cadre de l'espace et du temps ''données premières de notre vie quotidienne[39]. A partir de là, la physique établit un lien causal entre les phénomènes successifs puisqu'en fait, selon elle, l'état d'un système physique à un instant quelconque détermine, de façon univoque, son état à un instant ultérieur quelconque : « Cependant, j'ai beau vénérer le nom de Newton, je n'en suis pas pour autant obligé de croire qu'il était infaillible. C'est à regret et non avec joie que je constate qu'il pouvait se tromper, et son autorité a parfois, peut-être, retardé le progrès de la science ».[40]

[39] Louis de BROGLIE, *ibid*, P.38.
[40] Manjit KUMAR, *ibid*,P.82.

CHAPITRE II : LA REALITE DANS LA PHYSIQUE QUANTIQUE ET LES PROBLEMES ÈPISTEMOLOGIQUES LIES AUX CONTROVERS DE LA NATURE DE LA REALITE PHYSIQUE.

2-1- La conception de la réalité chez les physiciens de l'école de Copenhague.

« Une nouvelle vérité scientifique ne triomphe pas en convainquant ses adversaires et en leur faisant voir la lumière, mais plutôt parce que ses adversaires finissent par mourir, et que grandit une nouvelle génération à qui cette vérité est familière. » Ecrivit Max Planck[41] vers la fin de sa longue vie[42].

La physique quantique a été commentée par deux écoles différentes. La première est celle des réalistes dont Einstein, Planck, Schrödinger, Podolsky, Rosen, Bohm, Louis de Broglie et celle des phénoménologues ou école de Copenhague dont Bohr, Heisenberg, Max Born, Dirac, Pauli. De toutes ces deux écoles, celle qui aurait attiré notre attention est celle de Copenhague, de par son interprétation. Les termes « Interprétation de Copenhague » ou « école de Copenhague »[43] sont souvent utilisés à mauvais escient. Bohr ne les utilisait pas. « Interprétation de Copenhague » est apparue dans les années 1950 sous la plume de Heisenberg, qui auparavant avait seulement parlé de kopenhagener Geist (esprit de Copenhague), en 1929, terme traduit par copenhagen spirit dans un ouvrage paru en 1930.[44] L'interprétation de Copenhague est l'interprétation de la mécanique quantique, dont le principal architecte, Niels Bohr est établi à Copenhague. Au fil des années, il y eut des divergences d'opinion entre Bohr et d'autres éminents partisans de l'interprétation de Copenhague, comme par exemple Werner Heisenberg. Tous cependant, étaient d'accord sur ces dogmes principaux : le principe de correspondance de Bohr, le principe d'incertitude de Heisenberg, l'interprétation probabiliste de Born de la fonction d'onde, le principe de complémentarité de Bohr et l'effondrement de la fonction d'onde. Il n'y a pas de réalité quantique au-delà de ce qui est révélée par un acte de mesure et d'observation. Il est

[41] Max Karl Ernst Ludwig Planck, est le père de la physique quantique, le 14 décembre 1900, le physicien allemand Planck a lu devant l'Académie des sciences de Berlin un mémoire très audacieux qui allait donner naissance à ce que nous appelons aujourd'hui la physique quantique. C'est ce que nous lisons dans *Petit voyage dans le monde des quanta* d'Etienne KLEIN.

[42] Manjit KUMAR, *ibid*,P.20.

[43] L'école de Copenhague réunit autour de Bohr et Heisenberg, les physiciens comme Wolfgang PAULI, Paul DIRAC, Max BORN …

[44] Jean-Pierre PHARABOD, Gérard KLEIN, *ibid*, P.167.

donc absurde de dire, par exemple, qu'un électron existe quelque part indépendamment d'une observation effective. Bohr et ses disciples soutenaient que la mécanique quantique était une théorie complète, affirmation contestée par Einstein. En effet, « tout ce qui comptait maintenant, c'était de présenter les faits de telles manière qu'ils puissent, malgré leur nouveauté, être appréhendés et acceptés par tous les physiciens ».[45] Il était question d'exposer les grandes lignes de la physique quantique ou de l'école de Copenhague, c'est ainsi dans le cadre du congrès international de physique de Côme, du 11 au 20 septembre 1927, célébrait le centenaire de la mort du physicien italien Alessandro Volta, inventeur de la pile électrique. Tandis que le congrès battait son plein, Bohr continua de rédiger et de corriger ses notes jusqu'au jour prévu pour sa conférence, le 16 septembre. A l'Istituto Carducci, dans le public impatient d'entendre ce qu'il avait à dire, se trouvaient Born, de Broglie, Compton, Franck, Heisenberg, Von Laue, Lorentz, Kramers, Pauli, Planck et Sommerfeld. Certains membres du public eurent du mal à saisir tous les mots énoncés d'une voix douce par Bohr qui donnait pour la première fois les grandes lignes de son nouveau cadre conceptuel de la complémentarité, suivies d'une présentation du principe d'incertitude de Heisenberg et du rôle de la mesure dans la théorie des quanta. Bohr enchaina tous ces éléments, y compris l'interprétation probabiliste donnée par Max Born de la fonction d'onde de Schrödinger, de façon à ce qu'ils constituent les bases d'une nouvelle compréhension physique de la mécanique quantique. Les physiciens appelleraient plus tard cette fusion d'idées « l'interprétation de Copenhague ».[46] Cette conférence était pour Bohr la culmination de ce que Heisenberg décrivit plus tard comme « une étude intensive de toutes les questions concernant l'interprétation de la théorie des quanta à Copenhague ».[47] C'est dans ce sens Bohr disait : « Il n'y a pas d'univers quantique. Il n'y a qu'une description quantique abstraite».[48] En outre, lors du congrès Solvay prévu pour le mois d'octobre 1927 organisé par sa majesté le roi des Belges, qui sera consacré à la nouvelle mécanique quantique et aux questions qui s'y rapportent, ce qui se reflétait dans la composition du troisième groupe : Niels Bohr, William L. Bragg, Léon Brillouin, Arthur H. Compton, Louis de Broglie, Pieter Debye, Paul Dirac, Paul Ehrenfest, Ralph Fowler, Werner

[45] Manjit KUMAR, *ibid*, P.301.
[46] Manjit KUMAR, *ibid*, P.303.
[47] Manjit KUMAR, *ibid*. P. 303.
[48] Manjit KUMAR, *ibid*, P.306.

Heisenberg, Hendrik Kramers, Wolfgang Pauli, Max Planck, Erwin Schrödinger et C.T.R. Wilson. Les grands maitres de la théorie des quanta et les jeunes turcs de la mécanique quantique viendraient donc tous à Bruxelles. Arnold Sommerfeld et Pascual Jordan étaient les plus célèbres des exclus de ce qui ressemblait à l'équivalent chez les physiciens d'un concile théologique réuni pour régler un problème de doctrine controversé.[49] Cinq rapports seraient présentés pendant le congrès mais celui qui nous parait plus impressionnant est celui du duo Born et Heisenberg. C'était le mercredi 26 octobre, les partisans des deux versions rivales de la mécanique quantique s'adressèrent au congrès. Pendant la séance du matin, Heisenberg et Born présentèrent un rapport commun. Il était divisé en quatre sections principales : le formalisme mathématique, la physique quantique ne se fonde pas uniquement sur un formalisme, avons-nous dit. Elle requiert également ce qu'on appelle une interprétation physique. L'interprétation physique, le principe d'incertitude et les applications de la mécanique quantique. Cette présentation, comme la rédaction à quatre mains du rapport, fut un duo. Born, l'homme de l'expérience, se chargea de l'introduction et des sections I et II avant de passer la parole à Heisenberg. « La mécanique quantique, commençait leur communication, est fondée sur l'intuition que la différence essentielle entre la physique classique est la survenance de discontinuités».[50] Certains de leurs collègues déclaraient que la mécanique quantique était essentiellement : « une continuation directe de la théorie des quanta fondée par Planck, Einstein et Bohr ».[51]

Apres une présentation de la mécanique matricielle, de la théorie de la transformation de Dirac-Jordan et de l'interprétation probabiliste, ils se tournèrent vers le principe d'incertitude et la « véritable signification de la constante de Planck, h ».[52] Elle n'était rien de moins, affirmaient-ils, que « la mesure universelle de l'indétermination qui entre dans les lois de la nature au travers du dualisme des ondes et des corpuscules ».[53] Effectivement s'il n'y avait pas de dualité onde- particule de la matière et du rayonnement, il n'y aurait pas de constante de Planck ni de mécanique quantique. En conclusion, ils énoncèrent l'opinion provocante que « nous considérons la théorie des quanta comme une théorie close, dont les hypothèses physiques et mathématiques

[49] Manjit KUMAR, *ibid*, P.311.
[50] Manjit KUMAR, *ibid*, P.315.
[51] Manjit KUMAR, *Ibid*, P.315.
[52] Manjit KUMAR, *ibid*, P.315.
[53] Manjit KUMAR, *ibid, P.315.*

fondamentales ne sont plus susceptibles d'être modifiées ».[54] Cette clôture impliquait que nul développement futur ne modifierait jamais aucune des caractéristiques fondamentales de la théorie. Et personne ne souleva non plus d'objections lorsque seuls Born, Dirac, Lorentz et Bohr s'exprimèrent.[55] De plus l'interprétation de Copenhague affirme que la mécanique quantique fournit une description complète des évènements électroniques individuels dans l'expérience, le comportement de chaque électron est décrit par une fonction d'onde. Tandis que Paul Langevin dirait plus tard que « la confusion des idées atteignit son zénith »[56] au congrès Solvay 1927, Heisenberg estimait que cette réunion des cerveaux fut le tournant décisif dans l'établissement de l'exactitude de l'interprétation de Copenhague.

> Je suis à tous égards satisfait des résultats scientifiques, écrivit-il pendant que le congrès se terminait. Les opinions de Bohr et les miennes ont été généralement acceptées ; du moins personne ne soulève plus d'objections sérieuses, même pas Einstein ou Schrödinger. [57]

Pour Heisenberg, Bohr et lui avaient gagné. « Nous pouvions tout clarifier en utilisant l'ancienne terminologie et en la limitant par des relations d'incertitude, et obtenir quand même une image complètement cohérente »[58], se rappela-t-il presque quarante ans plus tard. Quand on lui demanda qui il entendait par ce « nous », Heisenberg répondit : « Je pourrais dire qu'à l'époque c'était pratiquement Bohr, Pauli et moi-même. »[59] Bohr ne parla jamais d'une « interprétation de Copenhague », et personne n'utilisa ce terme avant Heisenberg en 1955, repris par une poignée de sympathisants, il se propagea rapidement, tant et si bien que pour la plupart des physiciens « l'interprétation de Copenhague de la mécanique quantique ». Finit par devenir synonyme de « mécanique quantique ».[60] Trois facteurs expliquaient cette dissémination rapide et l'acceptation de l'« esprit de Copenhague ». Le premier était le rôle décisif de Bohr et de son institut. Inspiré par son séjour au laboratoire de Rutherford à Manchester quand il était jeune étudiant post-doctoral, Bohr avait réussi à créer son propre institut avec le même punch et la conviction que « tout était possible »[61]. « L'institut de Bohr devint rapidement le

[54] Manjit KUMAR, *ibid*, *P.335.*
[55] Manjit KUMAR, *ibid*, p .315.
[56] Manjit KUMAR, *ibid*, P.335.
[57] Manjit KUMAR, *ibid*, P.335.
[58] Manjit KUMAR, *ibid*, P.335.
[59] Manjit KUMAR, *ibid*, P.335.
[60] Manjit KUMAR, *ibid*, P.335.
[61] Manjit KUMAR, *ibid*, P.335.

centre mondial de la physique quantique, et, pour paraphraser les anciens Romains, « tous les chemins mènent à blegdamsvej 17 »[62], Bohr, lui, eut de nombreux enfants scientifiques contrairement à Einstein. Les premiers à atteindre la célébrité et à faire autorité dans leur domaine furent Heisenberg, Pauli et Dirac. Ils avaient beau être que des jeunes gens, comme Ralph Kronig le rappellera plus tard, d'autres jeunes physiciens n'osaient pas les contredire. Kronig, par exemple, renonça à publier l'idée du spin de l'électron après que Pauli l'eut tournée en ridicule. Deuxièmement, à l'époque du congrès Solvay 1927, un certain nombre de chaires professorales devinrent vacantes. Ceux qui avaient contribué à créer la nouvelle physique les occupèrent presque toutes. Les instituts qu'ils dirigeaient ne tardèrent pas à attirer la crème des étudiants d'Allemagne et de toute l'Europe. Schrödinger s'était octroyé le poste le plus prestigieux, en tant que successeur de Planck à Berlin. Juste après le congrès Solvay, Heisenberg arriva à Leipzig pour prendre son poste de professeur et de directeur de l'institut de physique théorique. Moins de six mois plus tard, avril 1928, Pauli quittait Hambourg pour devenir professeur à l'ETH de Zurich. Pascual Jordan, dont les compétences mathématiques avaient été vitales pour le développement de la mécanique matricielle, fut le successeur de Pauli à Hambourg. Assez vite, grâce à des visites régulières et des échanges d'étudiants et d'assistants entre leurs instituts et celui de Bohr, Heisenberg et Pauli confirmèrent Leipzig et Zurich comme centres de la physique quantique. Avec Kramers déjà installé à l'université d'Utrecht et Born à Göttingen, l'interprétation de Copenhague devint un dogme quantique. Enfin, malgré leurs différences, Bohr et ses jeunes collègues présentèrent toujours un front uni contre toutes les contestations de l'interprétation de Copenhague. La seule exception fut Paul Dirac. Nommé en septembre 1932 professeur titulaire de la chaire Lucas de mathématiques à Cambridge, qui fut jadis occupée par Isaac Newton, Dirac ne s'intéressa jamais à la question de l'interprétation. C'était pour lui une préoccupation inutile qui ne conduisait pas à de nouvelles équations. D'ailleurs, il se dit « physicien mathématicien », tandis que ni ses contemporains Heisenberg et Pauli, ni Einstein, ni Bohr ne s'étaient jamais décrits ainsi .ils étaient tous physiciens théoriciens, comme Lorentz, doyen incontesté du clan, qui mourut en février 1928.[63] En effet, un article de Bohr fut publié en trois

[62]Manjit KUMAR, *ibid*, P.335.
[63] Manjit KUMAR, *ibid*, P.335.

langues, anglais, allemand et français. La version anglaise intitulée « le postulat quantique et le développement récent de la théorie atomique »[64], parut le 14 avril 1928. « Le contenu de cet article, signalait une note de bas de page, le même que celui d'une conférence sur l'état actuel de la théorie des quanta donnée le 16 septembre 1927 lors des commémorations de Volta à Côme. »[65] En réalité, Bohr avait produit une exposition plus raffinée et plus profonde de ses idées sur la complémentarité et la mécanique quantique que ce qu'il avait présenté à Côme et à Bruxelles[66]. De plus, l'interprétation de Copenhague exige un observateur à l'extérieur de l'univers pour l'observer, or puisqu'il n'y en a pas sauf Dieu l'univers n'aurait jamais dû accéder à l'existence, mais devrait rester à jamais dans une superposition de multiples possibilités. C'est le vieux problème de la mesure. Il n'y a pas d'observateurs dans les mathématiques de la mécanique quantique.[67] En revanche, on attribuait à Bohr des pouvoirs de raisonnement et d'intuition quasi surnaturels. D'aucuns ont même suggéré que si d'autres étaient même obligés d'effectuer des calculs, Bohr n'en avait pas besoin. Clauser se rappela qu'à l'époque de ses études « une investigation déclarée portant sur les prodiges et les bizarreries de la mécanique quantique »[68] qui irait au-delà de l'interprétation de Copenhague était « pratiquement prohibée par l'existence de divers interdits religieux et pressions sociales qui, mis ensemble, équivalaient à une croisade évangélique contre cette forme de pensée ».[69] L'influence d'Einstein diminua, celle de Bohr augmenta. Avec des missionnaires comme Heisenberg et Pauli répandant la bonne parole à leurs propres ouailles, l'interprétation de Copenhague devint synonyme de mécanique quantique.[70]Pour les élèves de l'école de Copenhague, la mécanique quantique avait réussi tous les tests auxquels elle avait été soumise. Et elle est aussi efficace que la physique classique, c'est le mieux qu'on puisse dire. Elle a la capacité de fonctionner avec n'importe quelle expérience qu'on lui soumettait. Donc plusieurs méthodes sont acceptées lorsqu' il s'agit de l'étude des phénomènes de la nature. Sur ce, Paul Feyerabend nous dira que: «tout est bon »[71]. L'idée d'une méthode basée sur

[64]Manjit KUMAR, *ibid*, P. 337.
[65]Manjit KUMAR, *ibid*, P.337.
[66] Manjit KUMAR, *ibid*, P.337.
[67] Manjit KUMAR, *ibid*, P.425.
[68] Manjit KUMAR, *ibid*, P.424.
[69] Manjit KUMAR, *ibid*, P.424.
[70] Manjit KUMAR, *ibid*, P.423.
[71] Paul FEYERABEND, *contre la méthode*, 1975, Paris, Seuil, 1979, P.20.

des principes rigides et immuables auxquels il faudrait absolument se soumettre pour la conduite des affaires de la science rencontre des difficultés considérables lorsqu'elle se trouve confrontée avec les résultats de la recherche historique. Nous constatons alors qu'il n'y a pas une seule règle, aussi plausible et solidement fondée sur le terrain de l'épistémologie soit-elle, qui n'ait été violée à un moment ou à un autre. Ces violations ne sont pas des faits accidentels ; elles ne proviennent pas d'une connaissance insuffisante ou d'une étourderie qui aurait pu être évitée. Au contraire, elles sont nécessaires au progrès. En réalité, des évènements et développements tels que l'invention de l'atomisme dans l'antiquité, la révolution copernicienne, l'avènement de l'atomisme moderne (théorie cinétique, théorie de la dispersion, stéréochimie, théorie des quanta), la naissance progressive de la théorie ondulatoire de la lumière n'ont pu se produire que parce que quelques penseurs méthodologiques « évidentes », ou bien parce qu'ils ont transgressés involontairement est l'un des acquis majeurs des récentes sur l'histoire et la philosophie des sciences. Bohr termina en encourageant Schrödinger à débattre du contenu de sa lettre avec Planck et Einstein. Lorsque Schrödinger l'informa de cette correspondance avec Bohr, Einstein répondit que « la philosophie ou religion !-tranquillisante de Heisenberg-Bohr est si délicatement conçue que, pour l'instant, elle fournit au vrai croyant un mol oreiller auquel on ne peut pas très facilement l'arracher. Laissons-le donc dormir »[72]. Pendant un quart de siècle, la plupart des développements dans la physique quantique et ses applications depuis la loi du rayonnement du corps noir énoncée par Planck jusqu'au quantum de lumière d'Einstein, depuis l'atome quantique de Bohr jusqu'à la dualité onde-particule de la matière prédite par de Broglie, furent le produit du mariage mal assorti des concepts quantiques et de la physique classique.[73]D'une façon générale, elle indique seulement que si l'on effectue tel ou tel type de mesure on a telle ou telle probabilité d'obtenir tel ou tel résultat. Einstein avait été le premier à introduire les probabilités dans la physique quantique en 1916 lorsqu'il fournit l'explication de l'émission de quanta de lumière quand un électron sautait d'un niveau d'énergie à un autre. Peu après la visite de Pauli, Einstein exprima très clairement son opinion lorsqu'il reçut la médaille Planck des mains de Planck lui-même :

[72] Manjit KUMAR, *ibid*, P.338.
[73] Manjit KUMAR, *ibid*, P.193.

> J'admire au plus haut point les réussites de la jeune génération de physiciens qu'on désigne sous le nom de mécanique quantique et je crois au niveau profond de vérité de cette théorie, dit-il à son auditoire, mais je crois que la restriction aux lois statistiques ne sera pas éternelle.[74]

Einstein s'était déjà lancé dans l'observateur. Entre temps, il continuerait de contester ce qui était en train de devenir l'orthodoxie quantique, l'interprétation de Copenhague. Lorsqu'ils se rencontrèrent à nouveau lors du sixième congre Solvay en 1930, Einstein présenta à Bohr une boite à lumière imaginaire.[75] C'est ainsi Bohr aidé par Heisenberg et Pauli, avait cherché à démolir chacune des expériences imaginaires et à défendre l'interprétation de Copenhague. Selon le principe d'incertitude, une mesure qui donne la valeur exacte de la quantité de mouvement d'un objet ou d'un système microphysiques exclut jusqu'à la possibilité d'en mesurer simultanément la position. La question à laquelle Einstein voulait répondre était : L'impossibilité de mesurer directement la position exacte d'un électron signifie-t-elle que l'électron n'a pas de position définie ? L'interprétation de Copenhague répondait qu'en l'absence d'une mesure qui en détermine la position, l'électron n'a pas de position. En outre, à « l'attaque » d'EPR «, Bohr animé par l'esprit de Copenhague dont les effets furent remarquables sur lui. Bohr écrivit le 29 juin une lettre à la revue nature. Intitulée « mécanique quantique et réalité physique »[76], elle décrivait succinctement sa contre-attaque. Une fois de plus, le new York times flaira un scoop. « Divergence entre Bohr et Einstein ; ils entament une controverse sur la nature de la réalité. »[77] Telles étaient les manchettes de l'article qui parut le 28juillet. Les lecteurs apprenaient que « la controverse entre Bohr et Einstein vient de commencer cette semaine dans le dernier numéro de nature, la revue scientifique britannique (….) qu'un développement plus complet de cette argumentation sera donné dans un article qui paraitrait sous peu dans la *Physical Review*. »[78] Bohr délibérément choisi le même forum qu'Einstein et sa réponse de six pages, reçue le 13 juillet, s'intitulait-elle aussi : « la description de la réalité physique par la mécanique quantique peut-elle être considérée comme

[74] Manjit KUMAR, *ibid*, P.339 son voyage solitaire à la recherche d'une théorie du champ unifié dont il croyait qu'elle sauverait la causalité et la réalité indépendante de
[75] Manjit KUMAR, *ibid*, P.339.
[76] Manjit KUMAR, *ibid*, P.369.
[77] Manjit KUMAR, *ibid*.P.370.
[78] Manjit KUMAR, *ibid*, P.370.

complète ? »[79] la réponse de Bohr , publiée le 15 octobre, était un « Oui »[80] sans équivoque, incapable toutefois d'identifier la moindre erreur dans l'argumentation d'EPR, Bohr en fut réduit à affirmer que les preuves fournies par Einstein de l'incomplétude de la mécanique quantique n'étaient pas assez fortes pour soutenir le poids de pareille assertion .Recourant à une stratégie oratoire dotée d'une longue et illustre histoire, Bohr commença sa défense de l'interprétation de Copenhague en rejetant carrément la composante principale de l'argumentation d'Einstein démontrant l'incomplétude :le critère de réalité physique. Bohr pensait avoir identifié une faiblesse dans la définition d'EPR : la nécessité d'effectuer une mesure « sans perturber un système en aucune manière »[81] Bohr espérait exploiter ce qu'il décrivait comme une « ambiguïté essentielle »[82] du critère de réalité « lorsqu'il s'applique aux phénomènes quantiques »[83] en revenant publiquement sur l'affirmation qu'une mesure conduisait à une perturbation physique inévitable. C'est ainsi que Bohr estimait, que la nature nous a enseigné que le terme de ''phénomène'' ne peut s'appliquer aux processus atomique à moins qu'on ne précise également quel dispositif expérimental ou quels instruments d'observation sont impliqués. Si un dispositif expérimental particulier a été défini et qu'une observation particulière suit, alors nous pouvons, j'en conviens, parler d'un phénomène, mais pas de sa perturbation par l'observation, il n'empêche qu'avant, pendant et après le congrès Solvay, le fait que l'acte de mesurer perturbe l'objet observé était abondamment documenté dans les écrits de Bohr et était essentiel à son démontage des expériences de pensées einsteiniennes. Selon l'interprétation de Copenhague, les particules n'ont pas de réalité indépendante, elle ne possède pas de propriétés quand elles ne sont pas observées, conception qui fut résumée succinctement plus tard par le physicien américain John Archibald Wheeler : aucun phénomène élémentaire n'est un phénomène réel avant d'être un phénomène observé.[84] Un an avant EPR, Pascual Jordan porta le rejet d'une réalité indépendante de l'observateur jusqu'à conclusion logique : « Nous produisons nous-mêmes les résultats de la mesure ».[85] C'est pourquoi nous

[79] Manjit KUMAR, *ibid*, P.370.
[80] Manjit KUMAR, *ibid*, P.370.
[81] Manjit KUMAR, *ibid*, P.370.
[82] Manjit KUMAR, *ibid*, P.370.
[83] Manjit KUMAR, *ibid*, P.370.
[84] Manjit KUMAR, *ibid*, *P.374.*
[85] *Manjit KUMAR, ibid*, P.374.

pouvons dire que pour les disciples de Bohr et lui-même que la mécanique quantique avait longtemps prouvé sa valeur, et on ne se bousculait pas pour examiner de trop près la réponse de Bohr à l'argumentation d'EPR, car elle était obscure à l'aune même de ses propres normes. Même parmi les contestataires de la physique quantique, d'autres admettaient tel Schrödinger écrivant au sujet des « physiciens contemporains », il ne put dissimuler sa consternation devant leur insistance à proclamer que la « théorie des quanta fournit une description de la réalité, et même une description complète ».[86] En effet, l'interprétation de Copenhague assigne néanmoins une position privilégiée à l'observateur que ce soit un humain ou un dispositif mécanique, dans la construction de la réalité. Or la matière est intégralement composée d'atomes et donc soumise aux lois de la mécanique quantique, alors, comment l'observateur humain ou le dispositif de mesure peuvent-ils jouir d'une position privilégiée ?[87] C'est le problème de la mesure. Toutefois, la divergence entre Bohr et Einstein sur l'interprétation de la mécanique quantique aboutit à un débat philosophique sur le statut de la réalité. Existe-elle ? Bohr croyait que la mécanique quantique était une théorie fondamentale complète de la nature, et c'est sur elle qu'il édifia sa conception philosophique du monde. Ce qui lui conduit à déclarer : « Il n'y a pas d'univers quantique. Il n'y a qu'une description quantique abstraite. C'est une erreur de croire que la tâche de la physique est de découvrir comment est la nature».[88] La physique concerne ce que nous pouvons dire de la nature »[89] La mécanique quantique continue en tout cas de constituer le cadre formel et conceptuel de la physique quantique dans son ensemble, et elle contient à ce titre, les dispositions essentielles sur lesquelles porte l'interprétation[90]. Pour Bohr, la nouvelle doctrine physique demandait que l'on constitue sur elle une réflexion nouvelle sur la connaissance.[91] La physique quantique, elle, ne semblait pas pouvoir être associée à un « engagement ontologique » aussi fort : d'abord, elle n'accorde pas aux atomes (ni aux particules qui les constituent) une position, ni une trajectoire, ni une forme qui soient bien déterminées.[92]Enfin, il faut avouer que dans l'interprétation de Copenhague, les

[86]Manjit KUMAR, *ibid*, P.379.
[87] Manjit KUMAR, *ibid.*, P.380.
[88] Manjit KUMAR, *ibid*, 369.
[89] Manjit KUMAR, *ibid*, 369.
[90] Michel PATY, « *interprétation et signification en physique quantique* », revue *internationale de philosophie*, no : 212, juin 2000, P.15.
[91] Michel PATY, ART.Cit, P.14.
[92] Etienne KLEIN, *ibid*, P.149

instruments de mesure étaient inextricablement liés à l'objet de l'observation : aucune séparation n'est possible. Il était clair que Planck « était un révolutionnaire malgré lui » qui « était finalement arrivé à la conclusion. » Ça ne sert à rien. Nous allons être obligés de vivre avec la théorie des quanta. Et, croyez-moi, elle se répandra. ». C'était l'épitaphe qui convenait à un révolutionnaire malgré lui. Les physiciens furent en effet obligés de « vivre avec » le quantum. Le premier à le faire ne fut pas l'un des distingués collègues de Planck, mais un jeune homme qui vivait en Suisse, à Berne. Lui seul prit conscience de la nature radicale du quantum. Ce n'était pas un physicien de profession, mais un fonctionnaire subalterne à qui Planck attribua la découverte que l'énergie elle-même est quantifiée. Il s'appelait Albert Einstein.[93]

2-2- L'opposition d'Einstein

Pour Einstein, la croyance en l'existence d'une réalité indépendante de l'observateur était essentielle pour l'exercice de la science. Ce qui était en jeu dans le débat est sur le point de commencer entre Einstein et Bohr, c'était l'âme de la physique et la nature de la réalité. Toute contestation d'Einstein tire sa source du congrès de Solvay de 1927. Du moment où, après la communication de Bohr, trois autres orateurs s'étaient déjà exprimés lorsque Einstein indiqua à Lorentz qu'il désirait rompre le silence qu'il s'était lui-même imposé. « Bien qu'étant conscient du fait je ne suis pas entré assez profondément dans l'essence de la mécanique quantique, dit-il, je veux néanmoins présenter ici quelques remarques générales. »[94] La mécanique quantique, avait affirmé Bohr, « épuisait les possibilités de rendre compte des phénomènes observables ».[95] Einstein n'était pas d'accord. Einstein savait qu'il lui incombait de montrer que l'interprétation de Copenhague était incohérente et de démolir ainsi les prétentions de Bohr et de ses partisans qui voulaient que la mécanique quantique soit une théorie close et complète. Il recourut à sa tactique favorite l'expérience de pensée hypothétique effectuée dans le laboratoire de l'esprit. Einstein s'approcha du tableau noir et traça une ligne représentant un écran opaque avec une petite fente. Juste derrière l'écran, il dessina une courbe-circulaire représentant une plaque photographique. A partir de ce croquis, Einstein donna les grandes lignes de son expérience. Lorsqu'un faisceau d'électron ou

[93] Manjit KUMAR, *ibid*, P.51.
[94] Manjit KUMAR, *ibid*, P.320.
[95] Manjit KUMAR, *ibid*, P.320.

de photon frappe l'écran, certains vont passer à travers la fente et frapper la plaque photographique. A cause de l'étroitesse de la fente, les électrons qui la franchissent vont être diffractés comme autant d'ondes dans les directions possibles. Conformément aux exigences de la théorie des quanta, expliqua Einstein, les électrons sortant de la fente et se dirigeant vers la plaque photographique le font en tant qu'ondes sphériques. Les électrons frappent néanmoins la plaque en tant que particules individuelles. Il y avait, dit Einstein, deux points de vue distincts relatifs à cette expérience imaginaire.[96] Selon l'interprétation de Copenhague, avant que toute observation soit effectuée et frapper la plaque photographique en constitue une, il y a une probabilité non nulle de détecter un électron individuel en chaque point de la plaque. Même si l'électron ondulatoire est étalé sur une vaste région de l'espace, au moment précis où un électron particulier est détecté au point A, la probabilité de le trouver au point B ou en un point A, quelconque ailleurs sur la plaque devient instantanément nulle. Puisque l'interprétation de Copenhague affirme que la mécanique quantique fournit une description complète des évènements électronique individuels dans l'expérience, le comportement de chaque électron est décrit par une fonction d'onde. Et c'est là le hic, dit Einstein.[97] Si, préalablement à l'observation, la probabilité de trouver l'électron était « étalée » sur toute la surface de la plaque photographique, alors cette probabilité au point B et partout ailleurs devait forcement être instantanément affectée au moment précis où l'électron frappait la plaque au point A. Une telle instantanéité de l'« effondrement de la fonction d'onde »[98] impliquait la propagation d'une sorte de relation de cause à effet supraluminique interdite par la théorie de la relativité restreinte. Si un évènement en A est la cause d'un autre en B, alors il doit s'écouler un laps de temps entre eux pour permettre à un signal de voyager à la vitesse de la lumière de A à B. Einstein estimait que le non- respect de cette exigence, appelée plus tard localité, indiquait que l'interprétation de Copenhague était incohérente et que la mécanique quantique n'était pas une théorie complète de processus individuels. Einstein proposa une autre explication. Chaque électron qui passe par la fente suit l'une des nombreuses trajectoires possibles jusqu'à ce qu'il frappe la plaque photographique. Toutefois, soutenait Einstein, les ondes sphériques ne

[96] Manjit KUMAR, *ibid*, P.321.
[97] Manjit KUMAR, *ibid*, P.322.
[98] Manjit KUMAR, *ibid*, P.322.

correspondent pas à des électrons individuels, mais à un « nuage d'électron ».[99] La mécanique quantique ne donne pas d'informations sur les processus individuels, mais uniquement sur ce qu'il appela un « ensemble » de processus. Bien que chaque électron individuel de l'ensemble suive sa propre trajectoire distincte de la fente à la plaque, la fonction d'onde ne représente pas un électron individuel, mais le nuage électronique. Par conséquent, le carré de la fonction d'onde, représente non par la probabilité de trouver un électron particulier en A, mais celle de trouver un membre quelconque de l'ensemble en ce point. C'était, dit Einstein, une interprétation « purement statistique »[100], ce par quoi il voulait dire que la répartition statistique du grand nombre d'électrons frappant la plaque produisait le motif caractéristique de la diffraction. Bohr, Heisenberg, Pauli et Born ne savaient pas trop ou Einstein voulait en venir. Il n'avait pas clairement énoncé son dessein : montrer que la mécanique quantique était incohérente et était donc une théorie incomplète. Certes, pensaient-ils, la fonction d'onde s'effondre instantanément, mais c'était une onde de probabilité abstraite et non une onde véritable se propageant dans l'espace tridimensionnel ordinaire. Il n'était pas non plus possible de choisir entre les deux points de vue décrits par Einstein en se fondant sur l'observation de ce qui arrive à un électron individuel. Dans les deux cas, un électron passe par la fente et frappe la plaque en un point ou un autre. « Je me trouve dans une position très difficile parce que je ne comprends pas ce qu'Einstein veut prouver, avoua Bohr. C'est sans doute ma faute. »[101] Remarquablement, il dit ensuite : « je ne sais pas ce qu'est la mécanique quantique. Je crois que nous avons affaire à certaines méthodes mathématiques qui conviennent à la description de nos expériences. »[102]Pour renforcer ce caractère mathématique de la physique contemporaine, Ettore MAJORANA, nous dit ceci :

> La seule façon de rendre la vie plus facile à ceux qui se lancent dans l'étude de la physique de l'atome, sans sacrifier l'origine historique des concepts ni le formalisme que nous utilisons aujourd'hui, est de commencer par une discussion large et claire des outils mathématiques qui sont essentiels en physique quantique.[103]

[99] Manjit KUMAR, *ibid*, P.323.
[100] Manjit KUMAR, *ibid*, P.323.
[101] Manjit KUMAR, *ibid*, P.323.
[102]Manjit KUMAR, *Ibid*, P. 323.
[103] Etienne KLEIN, *En cherchant Majorana, le physicien absolu*, Paris, Flammarion, 2013, P.136

C'est ainsi Einstein écrivit à Arnold Sommerfeld que la mécanique quantique « est peut-être une théorie correcte des lois statistiques, mais c'est une conception inadéquate des processus élémentaires individuels ». Ensuite, il faut aussi admettre que le père de la relativité avait conçu une expérience dans laquelle il était possible de déterminer simultanément la position et la quantité de mouvement d'une particule avec une précision supérieure à ce qu'autorisait le principe d'incertitude. Dans la foulée, il avait apparemment contredit un autre dogme fondamental de l'interprétation de Copenhague. Pour lui, la mécanique quantique ne pouvait donc être la théorie fondamentale de la nature annoncée par Bohr. Et toutes les expériences imaginaires qu'Einstein avait proposées lors du congrès Solvay en octobre 1927, chacune, était conçue pour montrer que la mécanique quantique était incohérente. Car Einstein était venu à Bruxelles avec, dans ses bagages, une nouvelle expérience imaginaire conçue pour porter un coup fatal au principe d'incertitude et à l'interprétation de Copenhague.[104] En outre, Etienne KLEIN nous en rend compte des objections d'Einstein[105], dans son livre *Petit voyage dans le monde des Quanta*. Albert Einstein fut un physicien révolutionnaire à de nombreux égards. Il n'a pourtant jamais accepté certaines conclusions auxquelles la physique quantique conduit quand on la considère comme une théorie complète. Quelques années avant sa mort, il écrivait encore à Louis de Broglie, philosophiquement proche de lui. « Je dois ressembler à une autruche qui sans cesse cache sa tête dans le sable pour ne pas faire face aux méchants quanta. »[106] Einstein avait apporté plusieurs contributions décisives à cette nouvelle physique. Il la considérait comme une théorie très ingénieuse et louait tout à la fois sans la moindre réserve, son efficacité opératoire et sa portée pratique. Mais il y avait une chose qu'il ne lui reconnaissait pas : La capacité de dépeindre les structures intimes du réel tel qu'il existe indépendamment de nous, les objections du père de la relativité étaient de deux ordres. D'abord, à ses yeux, une bonne théorie physique devait éliminer le hasard, sinon de ses constructions, du moins de ses principes. Or la physique quantique stipule que connaissant l'état initial d'un système physique, on ne peut pas en général prédire avec certitude les résultats d'une mesure effectuée sur lui, mais seulement calculer les probabilités d'obtenir tel ou tel résultat si l'on pratique telle ou telle mesure. Einstein, tenait au « réalisme » ordinaire des

[104] Manjit KUMAR, *ibid*, P.320.
[105] Etienne KLEIN, Petit *voyage dans le monde des quanta*, Paris, Flammarion, 2004, p.96.
[106] Etienne KLEIN, *ibid*, P.96.

physiciens : la physique se doit de retrouver l'idée d'un monde réel dont les plus minuscules parcelles existent objectivement, c'est-à-dire comme existent les cailloux, les tables et les chaises, que nous les observons ou non. Pour Einstein, il y avait des faits, des évènements qui étaient réels : Ils n'étaient pas seulement des « réalités pour nous », mais bien d'authentiques « réalités tout court ».[107] De ce double constat, il tirait la conclusion que la mécanique quantique est incomplète au motif qu'elle échoue à des raisons des comportements des systèmes individuels, se contentant de prévoir les propriétés moyennes ou statistique des constituants de la matière. Les objections d'Einstein culminent en 1935 dans un article célébrissime de seulement quatre pages, dit « EPR » en référence aux initiales des auteurs : Einstein et ses deux collaborateurs du nom Boris Podolsky et Nathan Rosen, ce qu'Einstein démontre ensuite, de ce critère de réalité physique à la théorie quantique conduit à un paradoxe, le fameux « paradoxe EPR »[108]. Enfin, Einstein conclut qu'il doit exister un niveau de description plus fin de la réalité que celui proposé par la physique quantique, niveau qui reste à découvrir. Je pense qu'il restera toujours très difficile pour le physicien d'admettre qu'il n'existe pas une réalité physique indépendante des hommes qui l'observe. Car, les théories de la physique se sont développées en admettant la réalité du monde physique et en cherchant à en obtenir des représentations concrètes. Assurément, il ne leur échappait pas que le savant, en observant le monde physique et en mesurant les grandeurs dont la connaissance est nécessaire pour préciser l'image qu'il s'en fait, peut très bien perturber l'état de chose existant avant ses observations ou ses mesures, mais il n'y avait là rien qui parût porter atteinte à l'idée qu'il existe à chaque instant une réalité physique bien déterminée, extérieure aux hommes qui l'observent. Nous devons signaler que divers savants, parmi lesquels on compte des esprits aussi éminents qu'Einstein et Schrödinger, ont élevé de graves objections contre l'interprétation actuelle de la microphysique quantique et montré que cette interprétation conduit dans certains cas à des résultats paradoxaux et fort peu acceptables. Bien que leurs arguments aient été contestés, nous pensons personnellement, après y avoir longuement réfléchi, que ses arguments ont une grande valeur et jettent un doute sérieux sur l'ensemble des idées actuellement admises[109]. Pour finir, Alias Albert Einstein affirmait : « je crois encore en la possibilité

[107] Etienne KLEIN, *Petit voyage dans le monde des quanta*, Paris, Flammarion, 2004, P.100.
[108] Etienne KLEIN, *ibid*, P.102.
[109] Manjit KUMAR, *ibid*, P.320.

d'un modèle de la réalité, c'est-à-dire, d'une théorie qui représente les choses elles-mêmes et pas simplement la probabilité qu'elles se produisent. »[110] Il poursuit en affirmant que : « je suis en fait fermement convaincu que le caractère essentiellement statistique de la théorie quantique contemporaine doit être uniquement attribué au fait que cette (théorie) fonctionne avec une description incomplète des systèmes physiques. [111]». Albert Einstein, est resté fidèle aux principes de la physique Newtonienne jusqu'à son dernier souffle, c'est ainsi qu'il se pose la question suivante : « Dieu joue-t-il aux dés ? ». Il affirme à cet effet :

> Vous croyez en un Dieu qui joue aux dés, et moi à la loi et l'ordre partout dans un monde qui existe objectivement, et j'essaie de saisir à ma manière follement spéculative. Je crois fermement, mais j'espère que quelqu'un trouvera une démarche plus réaliste ou, plutôt, un fondement plus tangible que ce qui m'a été donné de trouver. Même le grandiose succès initial de la théorie des quanta ne me porte pas à croire au jeu de dés fondamental , bien que je sois très conscient que nos jeunes collègues interprètent cela comme une conséquence de la sénilité .Nul doute que le jour viendra où nous verrons que cette attitude instinctive était la seule correcte.[112]

Il faut oser dire aussi que la controverse entre Bohr et Einstein ne s'éteignit pas avec la mort de ce dernier. Bohr discutait comme si son vieil adversaire quantique était encore en vie : « Je vois encore le sourire d'Einstein, à la fois rusé, humain et amical »[113]

2-3- Les implications théoriques des controverses rapportées par Kumar en rapport avec l'objectivité scientifique.

2-3-1 La remise en cause du déterminisme scientifique : l'indéterminisme ou l'incertitude.

Le bouleversement majeur introduit par la physique quantique concerne le déterminisme scientifique. Comme nous l'avons dit plus haut, le déterminisme est la pierre angulaire de la physique newtonienne. C'est en effet, le pouvoir de prédire les phénomènes qui confère aux lois établies leur véritable validité. Sur cette base, les physiciens sont convaincus que les seules questions qu'ils ont à résoudre sont du type : « voici les conditions actuelles ; que va-t-il se passer maintenant ? » C'est ce pouvoir de prédire qui est remis en cause par la physique quantique. La constante de Planck impose une

[110] Manjit KUMAR, *ibid*, P.323.
[111] Manjit KUMAR, *ibid*, P.422.
[112] Manjit KUMAR, *ibid*, P.395.
[113] Manjit KUMAR, *ibid*, P.391.

limite inférieure à toute mesure sur les entités microphysiques. Pour faire court, nous dirons que, du fait qu'elles sont soumises à l'influence des quanta, les entités microphysiques sont affectées d'un coefficient non négligeable d'indétermination qui compromet tout projet ou tentative d'en avoir une observation et une mesure précises. Lorsque le physicien envisage de mesurer les données relatives à une particule quantique en effet, lorsqu'il essaie d'appréhender la réalité du monde microphysique, il y a toujours quelque chose qui lui échappe. C'est ce que révèlent les « relations d'indétermination » mises en place par Werner Heisenberg en 1927. Alors qu'en principe, toute particule est censée occuper une position donnée et se déplacer à une vitesse également mesurable, le photon, comme toutes les particules microphysiques, semble ne pas se plier à la possibilité de cette double référence. Tant et si bien que, dans l'hypothèse d'une mesure exacte de sa position, on n'aurait aucune connaissance de la vitesse à laquelle il se déplace. Inversement, lorsqu'on arrive à en mesurer la vitesse de façon précise, on n'a plus aucune idée de sa position. En raison de cette indétermination, de l'imprécision qui affecte la mesure des données relatives aux entités microphysiques, il est impossible pour le physicien d'en prédire l'état. C'est cette impossibilité établie par les relations d'indétermination de Heisenberg remettent en cause le principe du déterminisme. Ce qui est désarmant est que pour Heisenberg, l'impossibilité de faire des prédictions exactes ne provient pas de l'état de nos appareils ni de l'ignorance des lois qui régissent les entités microphysiques, une nature à laquelle personne ne peut rien changer évidemment. En effet, il est difficile de connaitre avec précision de façon simultanée la position et la vitesse d'un électron dans un atome. Une difficulté qui ne provient pas des physiciens mais plutôt de la nature selon Heisenberg. En outre,[114] Heisenberg regagna en hâte l'institut et commença à manipuler les équations qu'il connaissait si bien. La mécanique quantique imposait apparemment des restrictions sur ce qui pouvait être connu et observé. Mais comment la théorie décidait-elle de ce qui peut et de ce qui ne peut pas être observé ? La réponse était le principe d'incertitude. Heisenberg avait découvert que la mécanique quantique interdit, à un instant donné, la détermination précise simultanée de la position et de la quantité de mouvement d'une particule. Il est possible de mesurer exactement soit où se trouve un électron soit à quelle vitesse il se déplace, mais pas les deux à la fois. C'était le prix exigé par la nature pour

[114] Manjit KUMAR, *ibid*, P.284.

connaitre exactement l'une de ces valeurs. Plus l'une n'était connue avec précision, moins l'autre pouvait l'être. Heisenberg savait que, s'il avait raison, cela signifiait qu'aucune expérience effectuée à l'intérieur du royaume atomique du quantum ne réussirait à transgresser les limites imposées par le principe d'incertitude. Il était bien sûr impossible de « prouver » pareille affirmation, mais Heisenberg était certain qu'il devait en être ainsi, puisque tous les processus impliqués dans de pareille expérience, quelle qu'elle soit, « devaient nécessairement satisfaire aux lois de la mécanique quantique »[115].es jours suivants, il testa le principe d'incertitude, ou comme il préférait l'appeler, le principe d'indétermination. Dans le laboratoire de son esprit, il effectua une série d'« expériences de pensée »[116] imaginaires où il serait possible de mesurer simultanément la quantité du mouvement et la position avec une précision que ce principe disait impossible. Lorsqu'au fil des calculs il s'avéra que les limites fixées par le principe d'incertitude n'avaient pas été transgressées, une expérience en particulier prouva à Heisenberg qu'il avait réussi à démontrer que : « C'est la théorie qui décide de ce que nous pouvons et ne pouvons pas observer ».[117] Heisenberg avait déjà discuté avec un ami des difficultés impliquées par le concept des orbites d'électrons. Son ami soutenait qu'il devrait être en principe possible de construire un microscope permettant d'observer les trajectoires des électrons à l'intérieur de l'atome. Toutefois, de pareille expérience était à présent hors de question, car, d'après Heisenberg, « Pas même le meilleur microscope du monde ne pourrait franchir les limites fixées par le principe d'incertitude ».[118] Il ne lui restait plus qu'à le prouver en essayant de déterminer la position exacte d'un électron en mouvement. « Voir » un électron exigeait un microscope d'un genre particulier. Les microscopes ordinaires utilisent la lumière visible repérer exactement sa position. En 1923, Arthur Compton avait étudié la collision de rayons x avec des électrons et en avait tiré la preuve concluante de l'existence des quanta de lumière annoncés par Einstein. Heisenberg imagina que, comme dans une collision entre deux boules de billard, lorsqu'un photon de rayon gamma pour éclairer un objet, effectuent la mise au point sur le faisceau réfléchi pour obtenir une image. Les longueurs d'onde de la lumière visible sont beaucoup plus

[115] Manjit KUMAR, *ibid*, P.284.
[116] Manjit KUMAR, *ibid*, P.284.
[117] Manjit KUMAR, ibid, P.284.
[118] Manjit KUMAR, *ibid*, P.285.

grandes que l'électron et on ne pouvait donc pas s'en servir pour déterminer sa position exacte les ondes lumineuses déferleraient par-dessus lui comme des vagues par-dessus un galet. Il fallait donc un microscope utilisant les rayons gamma, « lumière » de longueur d'onde extrêmement courte et de fréquence très élevée, pour percute l'électron, il est dévié et renvoyé dans le microscope tandis que l'électron recule sous le choc. Toutefois, l'impact du photon gamma provoque une poussée discontinue plutôt qu'une transition sans heurt dans la quantité de mouvement de l'électron. Puisque la quantité de mouvement que possède un objet est égale à sa masse multipliée par sa vélocité, tout changement affectant sa vélocité induit un changement correspondant dans sa quantité de mouvement. Lorsque le photon gamma percute l'électron, il en modifie brutalement la vélocité. Le seul moyen de minimiser le changement discontinu affectant la quantité de mouvement de l'électron est de réduire l'énergie du photon et d'atténuer ainsi l'impact de la collision. Pour ce faire, il convient d'utiliser une lumière de plus grande longueur d'onde et de moindre fréquence. Or, ce changement de longueur d'onde ne permet plus de déterminer la position exacte de l'électron. Plus la position de l'électron est déterminée avec précision, plus sa quantité de mouvement devient incertaine, indéterminée et imprécise-et vice versa. Heisenberg démontra que si Δp et Δq (où Δ est la lettre grecque delta majuscule) sont l'« imprécision » ou l' « incertitude » avec lesquelles sont connues la quantité de mouvement p et la position q, alors Δp multiplié par Δq est toujours supérieur ou égal à $h/2\Pi$, ce qu'on peut écrire $\Delta p\, \Delta q \geq h/2\Pi$[119], où h est la constante de Planck. Telle était la forme mathématique du principe d'incertitude ou de l'« imprécision dans la connaissance des mesures simultanées »[120] de la position et de la quantité de mouvement. Heisenberg découvrit également « une relation d'incertitude »[121] impliquant un autre couple de ce qu'on appelle des variables conjuguées, l'énergie et le temps. Si ΔE et Δt sont les incertitudes avec lesquelles on peut déterminer l'énergie E d'un système et le moment où E est observé, alors $\Delta E \Delta t \geq h/2\Pi$.[122] Au début certains pensèrent que le principe d'incertitude était simplement le résultat des carences technologiques des dispositifs de mesure utilisés dans une expérience. Si on pouvait améliorer le matériel, croyaient-ils, alors l'incertitude

[119] Cette formule, est la formule mathématique que Heisenberg a mise en place pour démontrer son principe d'incertitude.
[120] Manjit KUMAR, *ibid*, P.286.
[121] Manjit KUMAR, *ibid*, P.286.
[122] Les relations d'incertitude impliquant des variables conjuguées.

disparaitrait. Ce malentendu naquit de la manière dont Heisenberg essaya d'extraire la signification du principe d'incertitude par le recours à des expériences imaginaires utilisant un matériel parfait dans des conditions idéales. Or, affirmait Heisenberg, l'incertitude était simplement un trait intrinsèque de la réalité. Il ne serait jamais possible de faire reculer les limites fixées par la valeur de la constante de Planck et imposées par les relations d'incertitude quant à la précision de ce qui est observable dans l'univers atomique. Plutôt que d'« incertain » ou d'« indéterminé », il aurait peut-être été plus correct de parler d'« inconnaissable » à propos de cette remarque découverte. Heisenberg pensait que c'était l'action même de mesurer la position de l'électron qui rendait impossible la détermination précise et simultanée de sa quantité de mouvement.[123] Sa nouvelle physique semblait ne fonctionner qu'avec l'aide d'une sorte de bizarre multiplication où X multiplié par Y n'était pas égal à Y multiplié par X. Avec des nombres ordinaires, peu importe dans quel ordre on les multiplie : 4x5 donne exactement le même résultat que 5 x 4, soit 20. « Les mathématiciens appellent commutativité cette propriété. Les nombres obéissent à la commutativité de la multiplication, si bien que (4x5)-(5x4) est toujours égal à zéro ».[124] C'était une règle de mathématique que tout enfant connaissait et Heisenberg fut profondément troublé en découvrant que, lorsqu'il multipliait ensemble deux tableaux, le résultat dépendait de l'ordre dans lequel ils étaient multipliés. (AxB)-(BxA) n'était toujours égal à zéro. Heisenberg avait accidentellement retrouvé la multiplication matricielle, dans laquelle X x Y n'est pas toujours égal à Y x X. En apprenant que le mystère de son étrange loi de multiplication avait été élucidé, Heisenberg se plaignit qu'« il ne savait même pas ce qu'était une matrice ».[125] Une matrice n'est en fait rien d'autre qu'un tableau de nombre placé dans une série de rangées et de colonnes, tout comme ceux que Heisenberg avait construit à Helgoland. Au milieu du XIX^{e} siècle. Le mathématicien britannique Arthur Cayley avait découvert comment additionner, soustraire et multiplier des matrices. Si A et B sont des matrices, alors A x B peut donner un résultat diffèrent de B x A. Tout comme les tableaux numériques de Heisenberg, les matrices ne sont pas nécessairement commutables. Mais bien avant Heisenberg c'est Born qui aurait pour la première fois introduit des symboles non commutables dans la physique quantique. A cet effet, il

[123] Manjit KUMAR, *ibid*, P.238.
[124] Manjit KUMAR, *Ibid*, P.238.
[125] Manjit KUMAR, *ibid*, P.240.

affirmait qu'il était très fier d'être « la première personne à écrire une loi physique avec des symboles non commutable »[126] Dirac avait vingt-trois ans en 1925, Dirac montra que la mécanique quantique diffère de la mécanique classique en ce sens que les variables q et p représentant la position et la quantité de mouvement d'une particule ne sont pas commutables, mais obéissent à la formule qu'il avait trouvée indépendamment de Born, de Jordan et Heisenberg. En mai 1926, il obtient son doctorat avec la première thèse au monde ayant pour sujet « la mécanique quantique ». C'est là un des traits essentiels de la théorie, d'où la nécessité d'utiliser comme outils mathématiques les matrices, ou, comme Dirac, les opérateurs.[127] Si une expérience visant à localiser un électron était suivie d'une autre destinée à mesurer sa vélocité et donc sa quantité de mouvement p, elles donneraient deux valeurs précises. Multiplier les deux valeurs l'une par l'autre donne un résultat A. Toutefois, répéter les expériences dans l'ordre inverse mesurer d'abord la vélocité, ensuite la position conduirait à un résultat totalement différent, B. Depuis qu'il avait découvert l'étrange règle qui faisait de l'ordre dans lequel deux tableaux de nombres étaient multipliés une composante essentielle du cadre mathématique de sa nouvelle mécanique, la raison physique de cet état de chose était restée enveloppée de mystère. Il avait maintenant levé le voile. Le principe d'incertitude avait révélé une différence fondamentale profonde entre la mécanique quantique et la mécanique classique. Ces concepts de la physique de tous les jours, établis depuis longtemps, « peuvent aussi être définis avec exactitude pour les processus atomiques »[128] disait Heisenberg. Toutefois, les limitations de ces concepts sont mises à nu lorsqu'on tente de mesurer simultanément un couple de variable conjuguées : la position et la quantité de mouvement ou l'énergie et le temps. Pour Heisenberg, le principe d'incertitude était la passerelle entre l'observation des trajectoires apparentes d'électron dans une chambre de Wilson et les mathématiques de la mécanique quantique. Il était convaincu que, si la mécanique quantique disait qu'une chose ne pouvait se produit, alors ne se produisait pas. Pour lui, il n'existe carrément pas d'électron avec une position bien définie ou une quantité de mouvement bien définie en l'absence d'une expérience destinée à mesurer sa position ou sa quantité de mouvement. Une réduction de l'indétermination de la position de la particule entraine donc une

[126] Manjit KUMAR, *ibid*, P.243.
[127] Manjit KUMAR, *ibid*, P.289.
[128] Manjit KUMAR, *ibid*, P.288 .

augmentation de l'indétermination sur son impulsion, c'est-à-dire sur sa vitesse. « On ne peut connaitre simultanément la position et la vitesse d'une particule quantique, comme s'il s'agissait simplement d'adapter au monde quantique l'adage selon lequel on ne peut avoir à la fois la vertu de la crémière et le sourire du crémier. » [129] La bonne façon d'interpréter le principe de Heisenberg consiste non pas à dire qu'il est impossible de déterminer simultanément la position et l'impulsion des particules, mais bien plutôt à affirmer que ces dernières ne possèdent jamais ces deux attributs simultanément.[130] Quant à la notion de trajectoire définie comme la juxtaposition à tout instant d'une vitesse et d'une position, elle n'a plus de sens non plus. Le principe de Heisenberg peut d'ailleurs se lire comme une limitation de la représentation corpusculaire des particules : Il indique précisément jusqu'où on peut aller trop loin avec les concepts classiques. Mais, contrairement à ce qui est souvent dit, le principe de Heisenberg n'est pas une limitation de notre pouvoir de connaitre puisque l'indétermination qu'il évoque n'est liée ni à l'imperfection du dispositif expérimental ni à une quelconque restriction de nos capacités de mesure.[131]

2-3-2- L'objectivité de la physique classique vue comme obstacle épistémologique en physique quantique : (subjectivité).

La théorie des quanta n'a pas seulement remis en cause le principe de la continuité de la matière, mais aussi les deux piliers majeurs de la physique classique que sont : Le déterminisme scientifique et l'objectivité. La physique newtonienne reconnait deux modes d'existence de la matière : Le corpuscule et l'onde. Le corpuscule occupe un point précis de l'espace à un moment précis : il a, à chaque instant une position et possède une vitesse. Un exemple : le morceau de craie. A l'opposé, l'onde occupe tout l'espace et ne peut donc être située à un point précis. Un exemple : le son que j'émets lorsque je parle ou lorsque je chante. Avec les entités microphysiques, cette distinction n'est pas simple à établir. On ne peut se prononcer avec assurance et précision sur la nature des dites entités. Le fait est qu'on ne peut pas les observer à l'œil nu ; il faut recourir à un dispositif

[129] Etienne KLEIN, *ibid*, P.49.
[130] Etienne KLEIN, *ibid*, P.50.
[131] Etienne KLEIN, *ibid*, P.51.

expérimental. Il se trouve que l'image sous laquelle se révèlent ces entités microphysiques dépend du dispositif choisi pour les observer. Selon l'appareillage mis en place pour les observer, les électrons, les photons et autres particules microphysiques apparaissent tantôt comme des corpuscules, tantôt comme des ondes, selon l'appareillage mis en place. Doit-on en conclure que les entités microphysiques ont une double nature, qu'elles sont à la fois corpuscules et ondes ? Ce dont on est sûr c'est que les particules élémentaires sont frappées d'une indétermination incompréhensible : «je crois que je peux me risquer à dire que personne ne comprend la mécanique quantique »[132], déclara le célèbre prix noble américain Richard Feynman en 1965, dix ans après la mort d'Einstein. Ce qu'il faut admettre désormais, essentiellement, est que parler de l'existence d'une réalité ou d'un phénomène microphysiques sans spécifier, de façon précise, l'appareillage utilisé pour l'observation, n'a plus aucun sens. Avant d'être observé, on ne sait pas ce qu'est l'électron ; on ne sait même pas s'il est. On ne peut donc se prononcer là-dessus, entendu qu'il ne prend forme qu'à partir du moment où l'on braque sur lui un appareillage. Et puisque la forme ou la configuration qu'il prend est fonction du dispositif choisi à cette fin, les physiciens ont dû conclure, logiquement, que la réalité du monde microphysique n'est pas indépendante de l'observateur ; mieux, elle est créée par l'observateur. Comme le dit Igor Bogdanov dans une interview accordée à Jean Guitton, « l'existence objective d'une particule élémentaire n'a pas de sens… En somme, le monde se détermine au tout dernier moment, a l'instant de l'observation. Avant rien n'est réel au sens strict ». Tout se passe donc comme si, en réalité, l'observateur lui-même qui ne voit que ce qu'il décide de voir. Plus encore, c'est lui qui, par sa décision d'observer et par l'appareil délibérément choisi à cet effet, « force » l'électron à se révéler.

> Bien qu'indivisible, il n'a pas une position, mais un nuage de position potentielle. Si l'on procède malgré cela à une mesure de position, l'électron répondra : « je suis là ». Mais cette réponse a été produite lors de la mesure, au hasard. L'électron n'avait pas de

[132] Manjit KUMAR, *ibid*, P.418.

> position, mais lors du processus de mesure, on l'a forcé à répondre à une question qui n'avait pas de réponse prédéterminée.[133] Affirmait N. Gisin.

Le critère de l'objectivité scientifique mis en place par la physique classique est, sinon battu en brèche, du moins inopérant en ce qui concerne le monde des entités microphysiques. Cette déduction est, on le devine aisément, lourde de conséquences philosophiques. C'est pourquoi certains physiciens, réunis autour d'Albert Einstein, s'opposèrent aux conclusions de la mécanique quantique. Contrairement à leur compère de l'Ecole de Copenhague qui acceptèrent d'abandonner l'idée d'objectivité, Einstein, De Broglie, Schrödinger et même Max Planck décidèrent de ressusciter le concept de réalité objective, concept sans lequel la recherche scientifique n'aurait plus aucun sens : « nous cessons de bien comprendre si nous nous en écartons »[134], écrit-il De Broglie.[135] Einstein croyait au « réalisme local » : qu'une particule ne peut être instantanément influencée par un évènement lointain et que ses propriétés existent indépendamment de toute mesure. Pendant le séjour de deux mois que Pauli effectua à Princeton en 1954, Einstein lui donna un projet d'article, rédigé par Born, qui concernait le déterminisme. Pauli en prit connaissance et écrivit à son ancien patron que Einstein ne tient pas le concept de « déterminisme » pour aussi fondamental qu'on le croit souvent ». Einstein le lui avait dit « catégoriquement et de nombreuses fois » au fil des années. « Le point de départ d'Einstein est plus '' réaliste'' que '' déterministe'', expliqua Pauli, ce qui signifie que son préjugé philosophique est de nature différente. »[136] Par « réaliste », Pauli voulait dire qu'Einstein présumait que les électrons, par exemple, possèdent des propriétés préexistant à tout acte de mesure. « Le cœur du problème, écrivit Einstein en 1950 à propos de la mécanique quantique, ce n'est pas tellement la question de la causalité, mais la question du réalisme. »[137] Pour Einstein, Bohr et ses disciples jouaient à un jeu dangereux pour ce qui concerne la réalité, on a assisté alors à une vive polémique entre les deux camps. C'est ainsi, Oskar Klein demanda[138]. « N'est-ce pas bizarre qu'Einstein éprouve de si grandes difficultés à accepter le rôle du hasard dans la

[133] N. Gisin cité par le professeur Désiré MEDEGNON dans son cours de l'histoire de la physique de deuxième année de philosophie en 2021.
[134] Louis de BROGLIE, *ibid*, p.43.
[135] Manjit KUMAR, *ibid*, P.419.
[136] Manjit KUMAR, *ibid*, P.420.
[137] Manjit KUMAR, *ibid*, P.420.
[138] Manjit KUMAR, *ibid*, P.371.

physique atomique ? ».[139] C'est parce que « nous ne pouvons pas faire d'observation sans perturber les phénomènes, dit Heisenberg. Les effets quantiques que nous introduisons avec nos observations introduisent automatiquement une certaine dose d'incertitude dans le phénomène à observer. Cet Einstein refuse de l'accepter, bien qu'il soit parfaitement au courant des faits »[140]. « Je ne suis pas entièrement d'accord avec vous », dit Bohr à Heisenberg. En tout cas je trouve toutes les assertions comme l'observation introduit l'incertitude dans le phénomène inexactes et trompeuses. La nature nous a enseigné que le terme de phénomène ne peut s'appliquer aux processus atomique à moins qu'on ne précise également quel dispositif expérimental ou quels instruments d'observation sont impliqués. Si un dispositif expérimental particulier a été définie et qu'une observation particulière suit, alors nous pouvons, j'en conviens, parler d'un phénomène, mais pas de sa perturbation par l'observation. Il n'empêche qu'avant, pendant et après les congrès Solvay, le fait que l'acte de mesurer perturbe l'objet observé était abondamment documenté dans les écrits de Bohr et était essentiel à son démontage des expériences de pensée einsteiniennes. Pour les partisans de l'école de Copenhague, la réalité existe dépendamment de l'observateur, quel que soit le type d'appareil utilisé. « Toute observation transfère une action minimale qui entache la mesure d'une indétermination obligatoire. »[141] L'univers quantique existe indépendamment de l'observation et que les effets physiques ne peuvent se transmettre à une vitesse supérieure à celle de la lumière.[142] Sous la pression de l'examen continuel auquel Einstein soumettait l'interprétation de Copenhague, Bohr renonça à s'appuyer sur la « perturbation » : Il savait qu'elle impliquait qu'un électron, par exemple, existait dans un état qui pouvait être perturbé. Au lieu de quoi, Bohr soulignait maintenant que tout objet microphysique en train d'être mesuré et le dispositif effectuant la mesure formaient un tout indivisible le « phénomène ». Il n'y avait absolument pas de place pour une perturbation physique due à la mesure. C'est pourquoi Bohr estimait que le critère d'EPR était ambigu. Hélas, la réponse de Bohr à EPR était loin d'être claire. Des années plus tard en 1949, il avoua une certaine « inefficacité d'expression » lorsqu'il relut son article. Il essaya de préciser que l'« ambiguïté essentielle »[143] à laquelle il avait fait

[139] Manjit KUMAR, *ibid*. P. 371.
[140] Manjit KUMAR, *ibid*, P.371.
[141] Etienne KLEIN, *ibid*, P.48.
[142] Manjit KUMAR, *ibid*, P.371.
[143] Manjit KUMAR, *ibid*, P.370.

allusion dans sa réponse à EPR résidait dans le fait d'invoquer des attributs physiques des objets quand on traite de phénomène ou on ne peut faire une distinction tranchée entre le comportement de ces objets eux-mêmes et leur interaction avec les instruments de mesure. Bohr ne contestait pas le fait qu'EPR puissent prédire les résultats de mesures possibles de la particule B en se fondant sur des connaissances acquises en mesurant la particule A. Une fois que la quantité de mouvement de la particule A a été mesurée, il est possible de prédire avec précision le résultat d'une mesure similaire de la quantité de mouvement de la particule B comme l'envisage EPR. Toutefois, Bohr soutenait que cela ne signifie pas que la quantité de mouvement soit un élément autonome de la réalité. C'est seulement lorsqu'une mesure « réelle » de la quantité de mouvement est effectuée sur B qu'on peut dire qu'elle possède une quantité de mouvement, la quantité de mouvement d'une particule ne devient « réelle » que lorsque celle-ci interagit avec un dispositif conçu pour mesurer cette grandeur. Une particule n'existe pas dans un état inconnu mais « réel » préalablement à la mesure. En l'absence d'une telle mesure qui déterminerait soit la position, soit la quantité de mouvement d'une particule, Bohr soutenait que cela n'avait pas de sens d'affirmer qu'elle possédait vraiment l'une ou l'autre.

Pour Bohr, le rôle du dispositif de mesure était crucial pour définir les éléments de réalité EPR. Ainsi une fois qu'un physicien a installé le matériel nécessaire à la mesure de la position exacte de la particule A, mesure à partir de laquelle on peut calculer avec certitude la position de la particule B, il est exclu de pouvoir mesurer la quantité de mouvement de A et donc d'en déduire la quantité de mouvement de B. Si, comme Bohr le concédait à EPR, il n'y a pas de perturbation physique directe de la particule B, alors ses « éléments de réalité physique » doivent être définis par la nature du dispositif de mesure et la mesure effectuée sur A. C'est aussi dans ce sens que le philosophe français Auguste Comte avait soutenu que, si toute théorie doit se fonder sur l'observation, l'esprit a également besoin d'une théorie pour effectuer des observations. « Si on abandonne la supposition que ce qui existe dans différentes parties de l'espace a sa propre existence réelle et indépendante, dit-il à Max Born en 1948, alors je ne vois vraiment pas ce que la physique est censée décrire. »[144] La physique quantique nous

[144] Manjit KUMAR, *ibid*, P.419.

impose toujours l'imprécision, la subjectivité et l'indéterminisme pour son efficacité.[145] Est-ce à dire que la physique quantique ne change rien au statut de l'objectivité ? Non car, comme nous l'avons montré, l'opération de mesure joue un rôle crucial dans l'énoncé des principes même de la théorie, de sorte que la description des appareils même de la théorie, de sorte que la description des appareils de mesure et celle du protocole de mesure interviennent explicitement dans la compréhension des phénomènes.

En conséquence, (c'est au moins qu'expliquent les tenant de l'école de Copenhague). Il est impossible d'obtenir une séparation nette entre le comportement des particules quantiques et leur interaction avec les appareils de mesure qui définissent leur véritable condition d'existence. Aucun phénomène ne peut être donc interprétés qu'auraient les objets eux même. De plus, le point important pour nous est que dans la liste de leurs arguments on retrouve presque toujours une évocation des débats concernant l'interprétation de la physique quantique, selon eux, la philosophie non réaliste de Bohr a fini par prendre le-dessus sur le réalisme passionné d'Einstein de sorte que le seul problème à résoudre serait désormais ; quel successeur ou réalisme opiniâtre et dépasser de la relativité doit-on choisir ?Ces derniers essentiellement Heisenberg, Bohr et Pauli défendent l'idée que le mot réaliste n'a pas de sens en lui-même. Ils refusent d'aborder les discussions qui portent sur son contenu au motif qu'elles sont immanquablement vaines. La physique quantique est efficace et, selon eux, c'est le maximum que l'on puisse lui demander. Il n'y a donc pas lieu d'exiger de sa part une portée cognitive plus profonde.

[145] Etienne KLEIN, *ibid*, P. 138.

CHAPITRE III : PORTEE DES THEORIES DE LA PHYSIQUE QUANTIQUE ET L'AVENIR DE LA SCIENCE.

3.1- Portée des théories de la physique quantique.

La science n'a pas pour but d'être utile, mais on connait de nombreux exemples d'évolution technologiques, ayant profondément marqué nos sociétés et changé nos vies qui sont nées de recherches fondamentales.[146] La mécanique quantique est sans doute le meilleur exemple d'une théorie extrêmement ésotérique devenue profondément utile. Esotérique, car sa description des phénomènes naturels implique qu'une particule se trouve réellement en plusieurs endroits à la fois, et ne se déplace qu'en explorant tout l'Univers simultanément. Utile, car comprendre le comportement des éléments les plus petits de l'Univers sous-tend la compréhension de tout le reste. Tout le reste ? Voilà une affirmation qui semble déraisonnable, vu la diversité et la complexité des phénomènes naturels. Et pourtant, nous avons découvert qu'absolument tout est bâti à partir d'une poignée de particules élémentaires, obéissant aux lois de la théorie quantique ; et ces lois sont si simples qu'on pourrait les résumer au dos d'une enveloppe. Cela même est en soi l'un des plus grands mystères : Pourquoi n'a-t-on pas besoin de toute une bibliothèque pour expliquer la nature essentielle des choses ? Notre expérience quotidienne du monde tient à des relations entre de vastes ensembles de milliards de milliards d'atomes et il serait insensé d'imaginer qu'on puisse déduire de principes fondamentaux le comportement des plantes ou des humains. Cette restriction ne réduit pourtant pas la radicalité du constat : tous les phénomènes sont réellement sous-tendus par la physique quantique des particules élémentaires. Considérez le monde qui vous entoure. Vous avez un livre fait en papier, fabriqué à partir de la cellulose des arbres. Ceux-ci sont des usines capables de se procurer des atomes et des molécules, de les décomposer et de recombiner en colonies interdépendantes, composées de plusieurs milliards de milliards de constituants. Ils y parviennent grâce à la chlorophylle, molécule composé de guère plus de cent atomes de carbone, d'hydrogène et d'oxygène, imbriqués dans un échafaudage compliqué, comprenant aussi quelques atomes de magnésium et d'azote. Cet assemblage capture la lumière de notre étoile, située à 150 millions de kilomètres : le soleil, qui est une fournaise nucléaire, d'un volume égal à un million de

[146] Brian COX et Jeff FORSHAW, *ibid*, P.6.

fois celui de la terre. L'énergie de son rayonnement parvient au cœur des cellules des feuilles, où elle permet de construire des molécules à partir de gaz carbonique et d'eau, libérant ainsi l'oxygène vital. Les arbres, les êtres vivants et le papier de notre livre, sont le produit de telle machine moléculaire. Nous avons découvert que toutes ces choses ne sont rien de plus que des assemblages d'atomes, et que toute la diversité des atomes ne repose que sur trois particules : les électrons, les protons et les neutrons. Nous avons également découvert que les protons et les neutrons sont eux-mêmes constitués d'entités encore plus petites appelées quarks, et c'est là que notre description s'arrête, au stade actuel de nos connaissances. A la base de tout cela, il y a la théorie des quanta.[147] De plus, les meilleures descriptions de trois de ces forces dont nous disposions les forces nucléaires forte et faible, agissent au cœur du noyau atomique, et la force électromagnétique, qui sert de lien dans les atomes et les molécules sont fournies par la théorie des quanta. Il y a du vrai à la base de tout cela, et le monde des quanta présente des aspects bien étranges. La théorie quantique décrit le monde avec précision, en utilisant des lois mathématiques avec autant de rigueur que Newton, Galilée. C'est bien pourquoi le comportement d'un électron soumis à un champ magnétique peut être calculé avec une précision extraordinaire. La théorie quantique fournit une description de la nature qui, détient un immense pouvoir prédictif et explicatif, couvrant une vaste gamme de phénomènes, des puces de silicium au fonctionnement des Etoiles. Pour planter le décor, cependant nous commencerons notre voyage au tournant du XX^{ème} siècle pour analyser les problèmes qui ont conduit les physiciens à une rupture radicale avec ce qui prévalait. La théorie des quanta est issue, comme c'est souvent le cas en science, de la découverte des phénomènes naturels ne pouvant être expliqués dans le cadre des paradigmes scientifiques de l'époque. Pour la théorie quantique, ils furent nombreux et variés. En 1924, se remémorant les deux premières décennies de la mécanique quantique, Ernest Rutherford, le physicien d'origine néo-zélandaise qui a découvert le noyau atomique à Manchester, écrivait : « L'année 1896 a marqué le début de ce qui a été justement appelé l'âge héroïque de la science physique. Jamais auparavant dans l'histoire de la physique, on n'a pu être témoin d'une période d'activité aussi intense, où les découvertes fondamentales se sont succédées avec une rapidité

[147] Brian COX et Jeff FORSHAW, *ibid*, P.8.

vertigineuse. »[148] Mais avant de nous rendre à paris en 1896 pour assister à la naissance de la théorie des quanta, interrogeons-nous sur l'origine du mot « quantum » lui-même. En 1900, c'est Max Planck qui introduit ce terme en physique. Il cherchait à décrire le rayonnement lumineux émis par les corps chauds nommé « rayonnement du corps noir » apparemment suite à une commande que lui avait faite une société d'éclairage électrique : il arrive parfois que des causes bien prosaïques ouvrent les portes de l'Univers. Plus loin, pour expliquer les propriétés de ce rayonnement, il formula l'hypothèse que la lumière est émise par petites quantités d'énergie, qu'il nomma « quanta ». Le mot lui-même désigne une quantité discontinue, un « paquet ». Au début, Planck considérait cette idée comme un pur artifice mathématique, mais en 1905, l'article d'Albert Einstein sur l'effet photoélectrique renforça son hypothèse. Ces résultats étaient d'une grande portée, car il suggérait que ces petits paquets d'énergie électromagnétique pouvaient être assimilés à des particules. Pour ce qui concerne toujours la physique quantique dans la connaissance du réel, [149]Etienne Klein nous en rend compte suffisamment dans ses écrits. Pour lui, la physique quantique permet également de décrire le comportement parfois étonnant des particules élémentaires qu'on aurait tort d'assimiler conformément à une représentation trop courante à de microscopiques petites billes, et explique comment les particules interagissent : Pour qu'il y ait interaction, il faut que « quelque chose » s'échange entre les particules et ce « quelque chose » ne peut jamais se réduire à « rien » il doit être au moins égal à un quantum du champ caractéristique de l'interaction considérée. Mais, contrairement à ce que l'on a souvent tendance à croire la physique quantique ne concerne pas que l'échelle microscopiques : Il faut également y avoir recours pour expliquer nombre de phénomènes macroscopiques. Cela vient de ce que les lois quantiques gouvernent de façon sous-jacente presque « souverainement », la plupart des propriétés et des caractéristiques des processus ou des corps qui nous environnent : processus chimiques, gaz et liquides, solides, métaux, et isolants
supraconducteurs …Même la vie dans la mesure où elle dépend de processus physico-chimiques du niveau de la molécule d'ADN ne pourrait être décrite en dehors des lois quantiques. La portée de la physique quantique va néanmoins bien au-delà du seul

[148] Brian COX et Jeff FORSHAW, *ibid*, P.11.
[149] Etienne KLEIN, *ibid*, p.12.

domaine cognitif ou explicatif. De plus,[150] directement ou indirectement, la mise à l'épreuve de l'inégalité de Bell contribua à la naissance de nouveaux domaines de recherche, tels que la cryptographie quantique, la théorie quantique de l'information et les ordinateurs quantiques. L'un des plus remarquables est la téléportation quantique, qui exploite le phénomène de l'intrication. Bien que cela semble relever du domaine de la science-fiction, en 1997, non pas une, mais deux équipes de physiciens réussirent à téléporter une particule. La particule ne fut pas physiquement transportée, mais son quantique fut transféré à une particule située ailleurs, ce qui téléportait en fait la particule initiale d'un lieu à un autre. La poussée psychologique réalisée par la physique mathématique est mise en évidence par M. Juvet, il insiste sur le fait que les idées les plus hardies et les plus fécondes sont dues à trois jeunes savants.

> Heisenberg et son émule Jordan sont nés avec le siècle , en Angleterre un étonnant génie…Dirac créa une méthode originale et nouvelle et découvrir les raisons théoriques profondes de ce qu'on appelle le spin de l'électron, il n'avait pas 25ans.Si l'on rappelle que Bohr était très jeune lorsqu'il proposa en 1913 son modèle d'atome et qu'Einstein découvrit à 25ans la relativité restreinte et proposa peu après pour la première fois une explication des lois du rayonnement par les quanta de lumière …On sera fondé à croire que le XXème siècle a vu une mutation du cerveau ou de l'esprit de l'homme particulièrement apte à débrouiller les lois de la nature (….) était due peut être à une mutation de l'esprit dirigé vers adaptation au monde des êtres mathématique.[151]

Par ailleurs,[152] on assiste aussi à l'arrivée d'étonnantes machines intriquables. Des physiciens sont même parvenus à utiliser l'intrication pour accomplir des tâches utiles qu'aucun des pères fondateurs de la physique quantique n'aurait pu imaginer ; cryptographie quantique, commençons par évoquer le domaine de la cryptographie, qui consiste à émettre des messages déchiffrables uniquement par l'émetteur et par le destinataire du grec ''kruptos'' qui veut dire « caché ». Ils obtiendront ainsi une « clé cryptographique ». Idéale pour coder des messages secrets. En ce sens que, les lois de la physique quantique assurent qu'aucun espion, aussi habile ou génial soit-il, ne pourra intercepter la clé quantique au moment où Paul et Jules échangent leurs particules intriquées, au moins sans que l'un et l'autre s'en aperçoivent. La faisabilité d'une telle « cryptographie quantique » intrinsèquement, a été récemment démontrée grâce à l'utilisation des photons intriqués transmis par fibres optiques. Ensuite, on parle

[150] Manjit KUMAR, *ibid,* P.427.
[151] Gaston BACHELARD, *Le nouvel esprit scientifique,* Paris, PUF, 2020, P.182.
[152] Etienne KLEIN, *ibid,* P.110.

également des fax quantique et téléportation. Pour ce qui concerne [153]les fax quantique, l'intrication a également ceci de spectaculaire qu'elle permet de « téléporter » une information quantique, c'est-à-dire de la transporter à distance. Il y a donc eu téléportation de l'information portée par ce photon, de façon absolument conforme. En effet, dans cette opération, aucun objet proprement dit n'a été transporté dans l'espace. Simplement, les propriétés physiques d'une particule ont été communiquées à distance à une autre particule identique, d'où le terme de « fax quantique ». Précisons que la téléportation quantique n'a rien à voir avec la téléportation que semblent permettre les technologies de l'information. Dans la téléportation quantique, rien de tel : il n'y a aucun support matériel qui serve à la transmission de l'information. Dire en ces termes, la téléportation quantique consiste à transmettre la forme d'un objet à un autre objet sans qu'il y ait déplacement de substance. Plusieurs expériences de téléportation ont déjà été réalisées par différentes équipes, soit avec des photons, soit avec des particules de matière par forcement élémentaires : en 2014, la revue science a publié un article de Ronald Hanson et de son équipe de l'université de Delft annonçant qu'ils avaient téléporté l'état quantique d'un atome (entité composite) vers un autre atome situé trois mètres plus loin, avec fiabilité parfaite. Par ailleurs, un jour, l'ordinateur quantique ? D'autres perspectives vertigineuses s'ouvrent dans le domaine du calcul informatique, même si rien ne permet aujourd'hui d'affirmer qu'elles aboutiront un jour à des réalisations concrètes. Il y a une décennie, dans la continuité des études lancées dès le début des années 1980 par le prix Nobel américain Richard Feynman, des chercheurs ont démontré qu'un ordinateur fonctionnant avec de tel bits quantiques (en bref, un « ordinateur quantique ») serait en théorie capable de calculer de façon « massivement parallèle » : Il effectuerait en même temps toutes les opérations correspondant à toutes les valeurs que peuvent prendre les bits quantiques. Grâce à de nouveaux algorithmes de calcul (notamment ceux proposés par Peter Shor en 1994), de telles machines auraient ainsi une efficacité nettement supérieure à celle des machines actuelles pour certains types d'opérations, comme la factorisation des très grands nombres. Mais, récemment, les équipes de chercheurs sont parvenues à réaliser de petits circuits supraconducteurs qui se comportent à la fois très performants (on peut les manipuler et les lire) et exploitables dans un circuit électronique. Il pourrait s'agir là d'une ébauche de la brique

[153] Etienne KLEIN, *ibid*, P.113.

de base d'un futur processeur quantique. L'utilisation d'états superposés ou intriqués dans le domaine du calcul scientifique n'en est qu'à ses débuts. En quelques années, elle est devenue un domaine de recherche très actifs, à la frontière de la physique et de l'informatique. [154]La nouvelle physique de la mécanique ondulatoire se rependit comme une trainée de poudre dans la communauté des physiciens européens au printemps 1926.[155]Si l'on reste, comme il convient sur le terrain scientifique, les premières thèses indéterministes à considérer sont celles qui forment la base de la théorie cinétique des gaz. Cette théorie a apporté une transformation profonde et durable de l'esprit scientifique. Elle a frappé maints philosophes.[156] Finalement, la simple remarque méthodologique de Heisenberg a été systématisée au point qu'elle est désormais inscrite au seuil de toute méthode microphysique mieux encore, la relation d'incertitude fournit à elle seule une véritable méthode. Elle sert en quelque manière à penser le microphénomène dans ses dualités essentielles ainsi, une des conséquences philosophiques les plus importantes du principe de Heisenberg est sans doute la limitation des attributions realistiques. Dans le domaine microphysique l'entrainement réaliste doit donc être combattu avec vigilance.[157] On a aussi entendu dire que les données recueillies par le satellite Planck allaient prochainement dévoiler le « visage de Dieu », à croire que celui-ci pourrait s'imprimer sur une carte du ciel.

3-2- L'avenir de la science

Ce n'est plus un secret pour les physiciens en particulier et pour les scientifiques ou épistémologues en général que la physique newtonienne par la portée ou l'efficacité de ses piliers phares a su s'imposer presque dans toutes les sciences ou dans toute l'épistémologie générale. Autrement dit, la physique classique par son déterminisme et l'objectivité trouvait également sa place primordiale dans toutes les sciences qui ont vu le jour après elle. Aux nombres de ces sciences figurent, la biologie moderne, la géométrie, la logique, les sciences humaines (géographie, sociologie), la chimie etc. Par exemple, pour le cas de la biologie moderne, essentiellement développée par Claude Bernard, ne saurait être comprise sans la physique classique. Toutes les sciences se sont

[154] Manjit KUMAR, *ibid,* P.271.
[155] Gaston BACHELARD, *Le nouvel esprit scientifique*, 1934, Paris, PUF, 2020. p.125.
[156] Gaston BACHELARD, *ibid*, P.130.
[157] Etienne KLEIN, *Discours sur l'origine de l'univers*, 2010, Paris, Flammarion, 2016. P.13.

inspirées de la physique classique. Toutefois, Selon Bachelard[158] Le réel n'est jamais « ce qu'on pourrait croire » mais il est toujours ce qu'on aurait dû penser. « La connaissance du réel est une lumière qui projette toujours quelque part des ombres. Elle n'est jamais immédiate et pleine .Les révélations du réel sont toujours récurrentes ».[159] « Accéder à la science, c'est spirituellement rajeunir, c'est accepter une mutation brusque qui doit contredire un passé ».[160] C'est alors en allant de difficultés en difficultés, de remises en question en remise en question que la science a vu le jour. On conçoit donc clairement en science rien est figé, les vérités sont absolument provisoires pouvant être perpétuellement remises en causes. Avec Bachelard, on peut conclure qu'il n'y a de science que du construit ; une construction qui favorise constamment le nouvel esprit scientifique qui bat en brèche ses divers obstacles. De quoi il s'agit en réalité ? Dans ce développement toutes les sciences sont le produit de la physique Newtonienne, en ce sens, qu'elles ont prises leur appuie des principes qui caractérisent la physique classique. Par conséquent, si les données de la physique classique changent, la science en générale change aussi de données car la physique quantique par l'usage de son indéterminisme de Heisenberg a su s'imposer dans l'épistémologie générale c'est-à-dire toute la science en générale. Bachelard,[161] prenant acte des ruptures profondes opérées par la physique relativiste et la mécanique quantique Bachelard propose en 1934 un nouveau discours de la méthode qu'il définit comme non cartésienne ; s'obligeant à une révision récurrente de ses hypothèses, la raison est dorénavant ouverte à la dialectique des progrès mathématiques et phénoménotechnique. A vrai dire il n'y a jamais eu de méthode éternelle indépendante de ses applications. Le nouvel esprit scientifique met en œuvre une épistémologie « non cartésienne » au lieu de rester en accord avec un fondement immuable, la science cherche sans cesse à se contredire ; elle progresse en rompant avec ses certitudes. Pour la suivre dans ses transformations le philosophe doit s'affranchir du cadre analytique clos imposé par le rationalisme cartésien et épouser une dialectique ouverte. C'est ce qui a été l'œuvre de Bachelard dans sa *Philosophie du non*, il nous fait part de cette nouveauté scientifique tranquillement immobile, ranimons notre

[158] G. BACHELARD. *La formation de l'esprit scientifique*, Paris, J.Vrin ,1967.p.16.
[159] G. BACHELARD, *ibid.*P.16.
[160] G. BACHELARD, *ibid*, P.17.
[161] Gaston BACHELARD, *ibid*, P.10.

querelle par les questions suivantes.[162] D'une manière plus précise, en vertu de cette nouvelle dialectique qui se présente dans le champ de la représentation, on va pouvoir faire jouer le principe d'indétermination qui se percute de proche en proche dans toute la science contemporaine.[163] Dans cette voie, il y a donc des connaissances nouvelles à acquérir .Des modifications si profondes doivent retentir sur tous les à priori de la connaissance, sur toutes les formes de la vie spirituelle. En résumé, nous comprenons de la façon la plus simple que les données de la physique quantique ont un impact sur toute la science en générale. Au-delà de tout, l'avenir de la science est toujours en voie de construction.

[162] Gaston BACHELARD, *ibid*, P.39.
[163] Gaston BACHELARD, *ibid*, P.72.

CONCLUSION

Le débat sur la notion de la réalité en physique quantique est un sujet très intéressant et passionnant. Notre travail en s'intéressant à Manjit KUMAR et à son œuvre : *Le grand roman de la physique quantique*. Dans le premier chapitre du travail, nous avons fait une présentation utile de la notion de la réalité et surtout celle de la physique. Avant d'exposer dans le deuxième chapitre la réalité dans la physique quantique et les problèmes épistémologiques liés aux controverses de la nature de la réalité physique, en faisant allusion à la conception de la réalité chez les physiciens de l'école de Copenhague, l'opposition d'Albert Einstein et les implications théoriques des controverses rapportées par KUMAR en rapport avec l'objectivité scientifique : l'indéterminisme de Heisenberg et la subjectivité quantique. C'est après justement ce développement que nous avons clairement montré la portée de la physique quantique dans la connaissance du réel et nous avons achevé le travail avec une vision progressive en d'autres termes, l'avenir de la science.

De tout ce qui précède, nous pensons qu'il pourrait y avoir une possibilité dans le futur bien entendu de concilier ou de dépasser les théories de la physique classique ou de la physique quantique comme l'ont suggéré les philosophes scientifiques tels que Poincaré et Destouches même si d'autres contestent la physique quantique jusqu'à leur dernier souffle comme Einstein et de Broglie. Notre avis, est que même s'il aurait une théorie unificatrice, nous sommes donc en mesure d'affirmer avec raison que le principe d'incertitude devrait s'imposer à toute théorie physique. De plus, Hawking nous en parle élégamment d'une théorie unificatrice dans son *une belle histoire du temps*, dans ce livre, il nous apprend que,[164]jusqu'à présent, la plupart des scientifiques se sont trop attachés à décrire le comment de l'univers pour se préoccuper du pourquoi. Par ailleurs , ceux dont le métier est de s'interroger sur le pourquoi , les philosophes n'ont pas été capables de suivre toutes les avancées théoriques de la science .Aux XVIIIème siècle , les philosophes considéraient que l'intégralité du savoir humain , y compris la science , relevait de leur domaine et ils discutaient de questions telles que l'origine de l'univers .Cependant, qu'aux XIXème siècles la science est devenue trop technique et trop mathématique pour les philosophes et penseurs, à l'exception de quelques

[164] Stephen HAWKING, *Une belle histoire du temps*, Paris, Flammarion, 2009, p .229.

spécialistes. Néanmoins, si nous parvenons vraiment à découvrir une théorie unificatrice, elle devrait avec le temps être compréhensible par tout le monde dans ses grands principes, pas seulement par une poignée de scientifiques. Philosophes, scientifiques et personnes ordinaires, tous seront capables de prendre part à la discussion sur le pourquoi de notre existence et de notre univers. Et si nous trouvions un jour la réponse, ce serait le triomphe de la raison humaine qui nous permettrait alors de connaitre la pensée de Dieu. [165]

[165] S.HAWKING , *ibid*, P.230.

FERERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- BACHELARD G., *La formation de l'esprit scientifique*, Paris, J. VRIN, 1967.
- BACHELARD G., *Le nouvel esprit scientifique*, Paris, PUF, 2020.
- BACHELARD G., *La philosophie du non*, Paris, PUF, 1966.
- BERNARD Claude, *Introduction à l'étude de la médecine expérimentale*, Paris, Flammarion, 1966.
- COX Brian et FORSHAW Jeff, *L'univers quantique*, Paris, Dunod, 2018.
- DE BROGLIE Louis, *Certitude et incertitude de la science*, Paris, Albin Michel, 1966.
- DEHEUVELS Paul, *La probabilité, le hasard et la certitude*, Paris, PUF, 2018.
- DESCARTES René, *Discours de la méthode*, Paris, (ePub), 2011.
- DESCARTES René, *Les principes de la philosophie*, Paris, Alquié ,1647.
- FEYRABEND Paul., *Contre la méthode*, Paris, Seuil, 1979.
- HAWKING Stephen, *Une belle histoire du temps*, 2009, Paris, Flammarion,
- KANT E., *Critique de la raison pure*, Paris, PUF, 1986.
- KLEIN Etienne. *Discours sur l'origine de l'univers*, Paris, Flammarion, 2016.
- KLEIN Etienne., *Petit voyage dans le monde des quanta*, Paris, Flammarion, 2004.
- KLEIN Etienne., *Matière à contredire*, Paris, Flammarion, 2019.
- KLEIN Etienne, *En cherchant Majorana, le physicien absolu*, Paris, Flammarion, 2013.
- KOYRE Alexandre., *Etudes Newtoniennes*, Paris, Gallimard, 1966.
- KOYRE Alexandre., *Etudes d'histoire de la pensée scientifique*, Paris, Gallimard,1973.
- KUMAR Manjit, *Le grand roman de la physique quantique*,2008, Paris, JC Lattès, 2011.
- PHARABOD J-P et KLEIN Gérard., *Heurs et malheur de la physique quantique*, Paris, Odile Jacob, 2017.
- VILLANI Cédric., *Les mathématiques sont la poésie des sciences*, Paris, Flammarion, 2018.

-MEDEGNON Désiré, 2017, « Le pragmatisme de Rorty: Entre universalisme et relativisme »in *European scientific journal*, no-29, pp. 202-215.

- JAEGER Lydia 1984, « L'univers irrésolu-Plaidoyer pour l'indéterminisme autour de la lecture d'un livre de Karl Popper » in *Fac –Réflexion*, no- 48, pp. 4-20.

WWW.Babelio.Com. Consulté le 16 Avril 2022 à 20H-34 min.

Table des matières

DEDICACES 2
REMERCIEMENTS 3
SOMMAIRE 4
RÉSUMÉ 5
ASTRACT 5
CHAPITRE I : GENERALITES SUR LA PHYSIQUE 8
1–1- De la notion de réalité. 8
1-2- Perception de la réalité en physique classique. 11
CHAPITRE II : LA REALITE DANS LA PHYSIQUE QUANTIQUE ET LES PROBLEMES ÈPISTEMOLOGIQUES LIES AUX CONTROVERS DE LA NATURE DE LA REALITE PHYSIQUE. 18
2-1- La conception de la réalité chez les physiciens de l'école de Copenhague. 18
2-2- L'opposition d'Einstein 28
2-3- Les implications théoriques des controverses rapportées par Kumar en rapport avec l'objectivité scientifique. 33
2-3-1 La remise en cause du déterminisme scientifique : l'indéterminisme ou l'incertitude. 33
2-3-2- L'objectivité de la physique classique vue comme obstacle épistémologique en physique quantique : (subjectivité). 39
CHAPITRE III : PORTEE DES THEORIES DE LA PHYSIQUE QUANTIQUE ET L'AVENIR DE LA SCIENCE. 45
3.1- Portée des théories de la physique quantique. 45
3-2- L'avenir de la science 50
CONCLUSION 53
FERERENCES BIBLIOGRAPHIQUES 55
Table des matières 57