

de la société de France
en 1975

LA MÉCANIQUE ONDULATOIRE ET SON RÔLE DANS L'ÉVOLUTION DES IDÉES (1)

par B. D'ESPAGNAT

(Professeur à l'Université de Paris XI)

Il va sans dire que je me sens très honoré mais en même temps bien confus de devoir prendre la parole dans des circonstances aussi pleines de sens. En fait, mon seul titre sérieux à m'adresser à vous c'est, je crois, l'intérêt que j'ai toujours porté aux idées générales de la mécanique ondulatoire. C'est donc avant tout un exposé d'idées générales que je vais vous faire. Je suis très reconnaissant aux responsables de la Société Astronomique de France et à la Société Française de Physique de m'en donner la possibilité à l'occasion du cinquantième anniversaire de la découverte fondamentale de M. de Broglie : découverte qui devait, précisément, donner le branle à toutes ces idées.

Evidemment, il y a une difficulté préliminaire. Nous autres, hommes de science, quand on nous parle d'idées générales, nous sommes facilement sceptiques. Nous redoutons le bavardage. Laissez-moi tenter de conjurer ces réticences en faisant appel à l'actualité. A l'occasion d'un congrès de biologistes, il y a environ un mois, le Président de la République récemment élu a appelé de ses vœux *la mondialisation de la pensée scientifique* : ce qui semble impliquer l'idée que la pensée scientifique mondiale n'existe pas, ou pas encore. A priori, ceci est bien déconcertant : quoi de plus mondial que la science ? Je crois cependant qu'un tel scepticisme peut nous servir de *clignotant*. En effet, la part de la pensée scientifique qui a évidemment valeur universelle prend de plus en plus, vis-à-vis du monde extérieur, les couleurs d'une pensée spécialisée, parcellaire, technique ; *d'une pensée qui, pour toutes ces raisons, n'en est pas une*, n'est pas une vraie pensée, aux yeux du monde. Je suis persuadé que c'est dans ce sens-là seulement que M. Giscard d'Estaing (et en tout cas une bonne part de l'opinion contemporaine) met apparemment en doute l'existence actuelle d'une pensée scientifique authentique ayant valeur universelle. Et dans les faits il faut bien avouer qu'ils ont un peu raison, du moins en ce qui concerne le grand nombre. Mais cela tient au fait que la pensée scientifique est subtile et difficile, et non au fait qu'elle n'existerait pas ou n'aurait pas valeur universelle. Je crois — bien au contraire — que les développements scientifiques récents contiennent des éléments qui en font en fait le « cœur dur », loin des modes, de la pensée de notre temps. Et il n'est pas de meilleur thème que la

(1) Conférence prononcée à la Société Astronomique de France le 13 novembre 1974.

mécanique ondulatoire et ses rejets ⁽¹⁾ (électrodynamique quantique, théorie de la matrice S) pour mettre en lumière cette idée.

Conservant ce but présent à l'esprit nous allons, si vous le voulez bien, procéder en trois étapes, d'importances d'ailleurs inégales. La première sera un très bref rappel historique et un rappel de la portée de la nouvelle mécanique en ce qui concerne le développement de la physique, la seconde concernera, et bien justement, les idées et perspectives générales et la troisième sera une tentative de discussion.

— I —

En ce qui concerne le *rappel historique*, il s'agit de développements que nous avons presque tous présents à l'esprit et nous pouvons donc être brefs. C'est pourquoi je ne décrirai pas le parallèle entre les principes de la mécanique et ceux de l'optique qui a conduit M. de Broglie à généraliser la dualité onde-corpuscule déjà connue dans le cas de la lumière, à l'étendre à la matière, à associer ainsi une onde à toute particule et enfin à préciser la valeur de la longueur d'onde associée à une particule libre de masse et de vitesse donnée ⁽²⁾. Ces associations fondamentales étant posées (elles devaient être confirmées peu après par les expériences de diffraction électronique) restait à trouver une « équation d'onde » pour de telles ondes. Ce fut le mérite de Schrödinger que de l'établir. Cette équation donnait la possibilité de traiter le cas des particules dans des champs de force. Par là fut définitivement fondée — avec l'aide du principe de Pauli — la théorie des atomes et des molécules en même temps qu'apparaissait un indispensable outil de travail pour l'étude de toute la microphysique. A la même époque cependant, en 1925, Born, Heisenberg, et Jordan jetaient indépendamment les bases d'une théorie atomique, fondée sur des principes apparemment très différents, et qui se référait à l'idée selon laquelle le théoricien doit s'efforcer de ne considérer, s'il le peut, que des quantités *observables*. Pendant quelques mois il y eut « sur le marché » deux théories apparemment rivales. Grâce encore une fois à Schrödinger, cette situation fut rapidement clarifiée. Dès 1926

⁽¹⁾ On connaît l'histoire complexe des idées qui ont accompagné l'essor de la physique au XX^e siècle. Nous renverrons d'abord le lecteur à L. DE BROGLIE, *Matière et Lumière*, Albin Michel 1939, *Continu et Discontinu en Physique moderne*, 1941, ainsi qu'aux ouvrages (souvent accessibles) des physiciens de cette époque, notamment W. HEISENBERG, *La Particelle et le Tout*, traduit récemment en français, Albin Michel, 1972 ou encore R. FEYNMAN, *La Nature des lois physiques*, Robert Laffont, 1970.

« L'électrodynamique quantique » qui fut clarifiée dans ses débuts (1926-1927) par des savants, tels que Dirac, Born, Heisenberg, Jordan, c'est essentiellement la théorie qui, par une quantification du champ électromagnétique, permet de rendre compte de l'existence des photons et de traiter de façon adéquate des interactions entre matière et rayonnement. La « matrice » S, introduite par Heisenberg en 1943, c'est ce que les mathématiciens appellent un « opérateur » qui permet, à partir de l'état antérieur d'un système de déduire son état ultérieur, compte tenu des équations gouvernant les interactions de l'électrodynamique quantique, et, bien entendu, satisfaisant aux principes de conservation physique (énergie, quantité de mouvement). (NDLR).

⁽²⁾ Voir les équations dans notre introduction (NDLR).

en effet ce physicien démontrait l'équivalence de ces deux théories. Les développements ultérieurs, tels l'extension relativiste et la théorie quantique des champs, dues en particulier à Dirac, sont trop foisonnantes pour être même résumés ici. Qu'il suffise de dire que la notion d'antiparticule ⁽¹⁾, en particulier, en est sortie.

Quant à la portée de cette nouvelle mécanique (« ondulatoire » ou « quantique », — les deux vocables sont synonymes) je suis embarrassé pour en parler tellement elle est générale. En fait, on peut dire que toute la physique moderne est construite sur deux piliers, la relativité et la mécanique dont nous commémorons aujourd'hui la naissance. Encore est-il vrai que dans la pratique les occasions d'appliquer la seconde sont plus abondantes que celles d'appliquer la première. En vérité une énumération des disciplines dans lesquelles cette théorie intervient est impossible tant ces disciplines sont nombreuses. J'aimerais cependant noter qu'en particulier la mécanique ondulatoire a permis (en droit) d'unifier la chimie avec la physique (certes il y a toujours des chimistes, fort heureusement ! Mais quand ils font des cours, ce sont en général des cours de mécanique ondulatoire). Et je voudrais également dire que, bien que conçue à l'origine comme une théorie de l'atome, cette mécanique pénètre de plus en plus (état solide, supraconductivité, etc.) le domaine du macroscopique ⁽²⁾. C'est là une des voies par lesquelles elle influe toujours davantage sur les éléments de notre activité extra-scientifique.

Ainsi donc, sous une forme ou sous une autre, les principes quantiques fondamentaux dominent le monde de la physique. Ils ont permis non seulement un progrès mais aussi une unification extraordinaire de notre savoir. Il n'est pas surprenant qu'un outil aussi *fort* sorte des normes familières. Qu'il nous oblige à penser le monde, et nos rapports avec le monde, autrement que ne le faisaient nos prédécesseurs. Et ceci nous amène à la seconde partie de cet exposé : le rôle des principes de la nouvelle mécanique dans le développement des idées.

— II —

Pour commencer, une remarque due à Weisskopf : c'est grâce au principe quantique qu'il y a ce que le langage commun appelle des êtres ; je veux dire des existants ayant des *formes* de types précis, qualitativement distincts les

⁽¹⁾ La notion d'antiparticule n'est pas une notion simple. Une particule et son antiparticule, lorsqu'elles entrent en collision, s'annihilent, avec production d'une importante quantité d'énergie, rayonnée sous forme de photons de haute énergie (rayons gamma) et de particules plus légères. Parfois, particule et antiparticule diffèrent par la charge (électron et positron, proton et antiproton) ; mais ce n'est pas une règle : ainsi un neutron et un antineutron sont-ils deux particules de charge nulle (NDLR).

⁽²⁾ Il est clair que l'auteur pense ici à des domaines de la physique classique où la mécanique quantique a profondément pénétré. Il pense aussi, comme nous, à l'importance en astrophysique des lois de la mécanique quantique ; on ne peut rien comprendre aux étoiles, aux galaxies, aux milieux dilués interstellaires, sans une connaissance profonde des lois de la physique micro-

uns des autres. La présence de tels *êtres* serait impossible dans un monde purement classique, où entre deux types caractérisés toutes les graduations intermédiaires seraient concevables. D'où la pauvreté du monde des étoiles à cet égard : elle est due au fait que les conditions de température et de pression qui permettent aux états liés quantiques de se former n'y sont pas satisfaites. Dans d'immenses espaces, la richesse de forme implicitement contenue dans le principe de quantification et le principe de Pauli ⁽¹⁾ reste virtuelle. Notre monde terrestre la réalise au contraire. Enfin il faut noter que tout ce chatolement de formes qualitativement diverses, le principe quantique le réalise grâce à l'introduction de *nombres entiers*. Ces nombres entiers, que Kepler avait vainement cherché dans les orbites des planètes, régissent les orbitales des atomes et des molécules. Ainsi, par un long détour, est remise à l'honneur (mais affinée, débarrassée de son caractère archaïque) une composante essentielle de la pensée pythagoricienne. Ceci sera notre premier exemple du fait que la pensée scientifique est une pensée universelle.

Ainsi, d'une certaine manière, et à un niveau très profond, la pensée quantique *explique* le chatolement si séduisant du monde terrestre. Mais qui dit « expliquer » pense souvent : « mettre un terme à toutes les questions », « réduire l'inconnu au bien connu ». Est-ce dans ce sens là que le principe quantique explique le monde ? Eh bien non, pas du tout. Car le voile une fois levé ne nous découvre pas un *mécanisme* dont le fonctionnement serait pour nous banal, au moins dans son principe. Le voile une fois levé, nous découvrons au contraire des perspectives bien surprenantes. Des perspectives qui relancent en fait les interrogations de nos ancêtres devant le spectacle du monde ; mais à un niveau moins naïf.

Parmi ces grandes questions, il faut, bien sûr, noter celle du *hasard*.

A cet égard remarquons d'abord un fait certain. C'est que les notions d'aléatoire et de probabilités ont conquis au cours du *xx*^e siècle une place prépondérante dans l'équipement intellectuel du commun des hommes et que la mécanique ondulatoire a contribué à cette évolution pour une part certainement importante. Quant au fond, cependant, les choses sont moins sûres. M. de Broglie, vous le savez, pense que la mécanique quantique redeviendra déterministe. L'immense majorité des physiciens estiment que c'est là un retour injustifié à des idées

(1) « Principe de quantification » : les échanges d'énergie entre matière et rayonnement ont lieu non d'une façon continue, mais par quantités discrètes, indivisibles d'énergie, les quanta ; dans des systèmes complexes, comme les atomes (formés d'un noyau entouré d'électrons) alors que la théorie classique prévoit (comme, autour du Soleil, pour les planètes) une infinité de types de mouvements, seulement *certain*s types d'orbites sont possibles au sein de l'atome, définies par les valeurs entières d'un *petit* nombre de quantités appelées « nombres quantiques ».

« Principe de Pauli » : dans un atome donné, au sein de la communauté des électrons qui orbitent autour du noyau, *il ne peut y avoir deux électrons dont les orbites sont caractérisées par le même jeu de nombres quantiques*. Ce principe (ou « principe d'exclusion ») a reçu des formes beaucoup plus élaborées, s'appliquant à des ensembles de particules dans des systèmes déterminés. Il faut noter que sous sa forme limitée ci-dessus, le principe d'exclusion permet d'expliquer la table des éléments de Mendeleev : tous les états quantiques possibles sont successivement remplis autour de l'atome par les divers électrons de son cortège électronique. Nous n'entrons pas dans les détails, qui figurent dans la plupart des traités de physique, que ce soit au niveau des classes terminales ou à celui des universités (NDLR).

anciennes. Personnellement je pense que ce qui fait problème, ce n'est pas tellement l'apparition dans la théorie d'un aléatoire de principe. On pourrait imaginer un monde matériel soumis à l'aléatoire de principe mais où la notion de réalité des micro-objets garderait le caractère absolu qu'elle a dans le sens commun. Mais ce n'est pas le monde que nous décrit la nouvelle mécanique. Ce que je veux dire, c'est que la structure conceptuelle de la mécanique quantique est beaucoup trop subtile pour que cette mécanique puisse être qualifiée purement et simplement de théorie aléatoire. Je crois — en d'autres termes — qu'à cet égard l'affinement des idées qu'aura permis la nouvelle mécanique aura été de nous montrer que la question « hasard vrai ou non » est une question mal posée. Ce n'est certes pas une question absurde mais c'est une question qu'on ne peut valablement aborder qu'après en avoir transformé les termes en creuset des autres questions, si j'ose m'exprimer ainsi. On a dit qu'« Einstein ne croyait pas à l'indéterminisme ». On cite volontiers sa phrase « le Bon Dieu ne joue pas aux dés ». Mais c'est là un propos un peu anecdotique. Le problème n'était pas le plus fondamental à ses yeux. Le problème qui préoccupait surtout Einstein est que la mécanique quantique conduit à remettre en question des concepts aussi fondamentaux que celui d'objet et à réviser toutes les vues courantes de la science quant à la relation sujet-objet. C'est un autre problème que celui de l'aléatoire. Et bien plus grave. Quant au concept d'objet par exemple, la mécanique quantique actuellement utilisée, ainsi que ses rejets : théorie quantique des champs, matrice S, etc. sont unanimes. Toutes nient que cela ait même un sens de parler de propriétés (positions, composantes de spin, etc.) de micro-systèmes indépendamment des conditions d'observation de ces systèmes. Nous reviendrons sur ce point qui est fondamental. Curieusement, les idées issues de la mécanique quantique s'harmonisent très bien, à cet égard, avec celles issues de certains travaux de psychologie expérimentale. Je pense en particulier aux recherches de Piaget, qui indiquent que la notion d'*objet* permanent et localisé n'est *pas innée* mais *construite*. Au cours de sa première année le bébé se forge véritablement ce concept. On peut dire qu'il se le forge au titre d'élément central d'une théorie destinée à rendre compte de l'expérience. Il projette ses possibilités d'action et celles de son entourage. Il procède donc comme un théoricien. La différence est que le champ d'expériences du bébé est assez restreint. Ce qui est remarquable et extraordinaire c'est donc que ce concept *soit* extrapolable avec succès à tant d'expériences qui ont lieu hors du berceau : ce n'est *pas* le fait qu'il se révèle *finalement inadapté* quand nous poussons nos recherches beaucoup plus loin que l'expérience familière. Nous sommes loin, vous le voyez, de la notion d'idées claires et distinctes chère à Descartes.

La mécanique quantique vient de nous donner une leçon que la relativité donne aussi : méfiance devant les concepts issus de l'expérience familière. Ne pas les ériger en absolus. Cependant cette leçon, la mécanique quantique la tempère tout de suite par une autre, qui, celle-là, lui est bien propre. Elle nous dit : bien que les *instruments* soient faits d'atomes, qui sont quantiques, décrivez ces instruments dans un langage purement classique. Et énoncez les principes fondamentaux en termes de *mesures*, décrites dans ce langage. Autrement dit : utilisez de vieux concepts, ceux de la physique classique et de la langue familière bien que vous connaissiez maintenant leurs déficiences. Et utilisez-les, non pas comme approximation grossière mais pour énoncer ce qu'il y a de plus fondamental dans la physique quantique.

Voilà cette fois qui ressemble à un paradoxe : la physique classique est une approximation de la physique quantique, les concepts classiques sont donc un peu branlants et mal définis mais « la physique quantique a besoin des concepts classiques pour sa propre formulation » (Landau et Lifshitz).

Est-ce un paradoxe vraiment ? Je crois qu'il est ressenti ou non comme tel selon qu'on est *très ou peu* ambitieux pour la science et pour le type de connaissance qu'elle peut fournir. Encore une fois c'est ce que nous voulions mettre en évidence : la nouvelle mécanique, pour peu qu'on la scrute, nous force à des interrogations fondamentales. Incontestablement, la physique quantique d'aujourd'hui tend à promouvoir sur ces questions une attitude de modestie et d'efficacité plutôt que d'ambition contemplative. Le monde n'est pas pour elle une machine dont il nous serait donné de contempler les rouages. Nous ne pouvons décrire je ne sais quelle Nature « en soi ». La connaissance objective n'est donc pas, selon cette théorie, une connaissance de la Nature en soi. En fait, la fameuse objectivité scientifique se réduit, pour la physique quantique qui a actuellement cours sur le marché — si j'ose dire —, à une simple intersubjectivité (nous reviendrons dans la discussion sur ce point intéressant). Mais d'autre part, cette même physique montre aussi — et ce n'était pas évident — que cette simple intersubjectivité *suffit* pour accommoder un formalisme qui permet, en droit, de répondre sans ambiguïté à toutes les questions scientifiquement bien posées, c'est-à-dire posées de façon opérationnelle. Et son efficacité n'est plus à démontrer comme nous l'avons vu tout à l'heure.

Enfin, pour clore cette revue des idées quantiques et avant d'aborder la discussion, permettez-moi de dire un mot de ce qu'on appelle la « logique quantique ». Pour être bref, disons qu'il s'agit de définir des propositions concernant les systèmes physiques de façon opérationnelle en les associant à des mesures (et plus précisément à des filtres ⁽¹⁾) et que ceci conduit à associer ces propositions aux projecteurs mathématiques dans des espaces abstraits dits de Hilbert ⁽¹⁾. Or les ensembles de tels projecteurs n'ont pas la structure mathématique (dite de treillis Booléen ⁽¹⁾) que possèdent les ensembles de propositions obéissant à la logique

⁽¹⁾ La physique moderne fait intervenir, comme des langages commodes, et même comme des moyens de découverte, des notions mathématiques souvent difficiles. La notion de « filtre » est familière aux radioélectriciens ; ici, elle est généralisée à des systèmes qui en procédant à la mesure, sélectionnent nécessairement certaines quantités observables, celles qui sont importantes au point de vue de l'instrument, et le théoricien doit aussi donner à ces « observables » une importance inhérente à cette qualité. Les espaces de Hilbert sont des ensembles dont les éléments sont définis comme obéissant à un certain nombre de principes, dont nous ne donnerons pas ici la liste. On peut en tous cas donner un exemple : les états quantifiés d'un atome, tels qu'ils résultent de la théorie de Schrödinger sont les éléments d'un espace de Hilbert.

La structure mathématique de « treillis Booléen » (du nom de Boole, George, logicien anglais, 1815-1864) caractérise un ensemble d'éléments munis d'une relation « d'ordre partiel » (telle que à tout couple d'éléments a et b de l'ensemble E , on puisse faire correspondre deux autres éléments de E , c et d , tels que : $c < a$; $c < b$; $d > a$; $d > b$), choisis parmi les ensembles booléens (dont les éléments obéissent à des règles opératoires, dont encore une fois nous ne donnerons pas ici la liste). Voir Warusfel, Dictionnaire raisonné de mathématiques, Le Seuil, 1966, pour des indications complémentaires élémentaires (N.D.L.R.).

usuelle (ils introduisent à des logiques à plus de deux valeurs). La question est ainsi « faut-il donc changer la logique ? » De nouveau la physique quantique nous met devant une question qui a l'allure d'une interrogation fondamentale.

— III —

Nous venons d'énoncer *plusieurs* questions fondamentales : notion de réalité objective, nature de la connaissance, structure de la logique, etc. que la théorie quantique nous force à nous poser. Dans la dernière partie de l'exposé je voudrais essayer de vous montrer que cette théorie ne fait pas que poser des questions, mais qu'effectivement elle fournit aussi au moins quelques *éléments* de réponse. Malheureusement, dans un temps aussi court, il n'est pas question d'une discussion systématique. Je ne peux en donner que l'esquisse d'une esquisse, selon l'expression « in » de cet automne. Cela dit, reprenons si vous le voulez bien nos questions, mais dans l'ordre inverse.

D'abord : faut-il modifier la logique ?

On a beaucoup joué avec la logique et pas toujours avec succès : chacun a présente à l'esprit la mésaventure de Hegel qui prétendait montrer l'inexistence des astéroïdes sans en appeler à l'expérience, au moyen de la pure logique et à grands coups de dialectique. Je rappelais ceci seulement pour dire qu'en ces domaines il faut un sens critique aigu.

Et dans cet esprit, on peut indiquer l'argument suivant, en partie fondé sur une idée de Clauser et Bell et concernant la logique quantique. Imaginez un système mécanique simple, par exemple deux billes mobiles sur une sphère fixe. Mais imaginez d'autre part que les mesures que nous pouvons faire sont soumises aux restrictions suivantes. D'abord toute mesure individuelle donne seulement une information par oui ou par non concernant les positions relatives des deux billes et d'un plan équatorial de notre choix. Et deuxièmement chaque mesure perturbe les positions des deux billes selon une loi bien définie. Dès lors, si à chaque mesure possible nous associons une proposition a, b, \dots et si nous définissons les propositions a et b et a ou b de façon opérationnelle comme on fait en logique quantique, alors on peut préciser ce modèle mécanique de telle manière que l'ensemble des propositions ainsi définies soit un treillis *non* Booléen ⁽¹⁾, et même une logique quantique sur l'espace des particules de spin $1/2$. Cependant, un démon de Maxwell qui pourrait connaître avec précision les positions des boules sans les perturber décrirait lui, le système comme un système purement classique, donc au moyen de la logique traditionnelle.

Ce qui résulte de ceci c'est que nous devons nous méfier des illusions possibles. L'apparition de la logique quantique est *peut-être* inscrite au fond des choses, c'est *peut-être* quelque chose de fondamental mais ce n'est pas *nécessairement* quelque chose de fondamental. Au surplus, je ne fais qu'indiquer là les tous premiers éléments d'une discussion qui devrait être poursuivie.

La question de la logique quantique est un peu marginale du fait que peu de théoriciens parient sur sa nécessité. Mais nous devons discuter main-

⁽¹⁾ Voir le renvoi de la page précédente.

tenant une question bien plus importante car elle concerne un système conceptuel sur la validité duquel pratiquement tous les physiciens parient. Je veux parler des idées que nous esquissions tout à l'heure et que Bohr et l'école de Copenhague ont mis à la base de la physique atomique et subatomique. Vous vous rappelez : voilà ce que nous disions :

1. « l'objectivité scientifique n'est qu'une simple intersubjectivité » ;
2. « impossible de penser les systèmes physiques comme ayant des propriétés définies (connues ou inconnues) indépendamment des conditions d'observation. »

Voyez-vous : je crois que nous devons tous nous faire un reproche ! Nous sommes tous, bien sûr, disciples de Bohr en ce qui concerne la physique quantique. Mais nous avons tendance à fermer les yeux. Quand on nous rappelle que Bohr pensait ce qu'on vient de dire, nous avons tendance à nous dire : bah ! c'était là sa philosophie personnelle, mais moi j'en ai une autre dans laquelle bien sûr les objets existent avec leurs propriétés indépendamment de la manière dont on compte ou non les observer, etc... Et nous ne nous donnons pas la peine de vérifier si cela « marche » encore.

Einstein, lui, était moins paresseux. Il pensait comme les « nous » que nous venons de mettre en scène, ce que prouve le texte suivant :

« ... ma conception d'une thèse qui se trouve catégoriquement rejetée par les plus grands théoriciens actuels : il y a quelque chose comme « l'état réel » d'un système physique, qui existe objectivement, indépendamment de toute observation ou mesure et qui peut en principe se décrire par les moyens d'expression de la physique... Tous les hommes, y compris les théoriciens quantiques, tiennent fermement, en effet, à cette thèse sur la réalité tant qu'ils ne discutent point les fondements de la théorie quantique. » (EINSTEIN, dans *Louis de Broglie physicien et penseur*, Paris, 1953).

Pas plus que beaucoup d'entre nous, Einstein n'adhérait donc aux thèses 1 et 2 ci-dessus de l'École de Copenhague. Mais *lui*, il a pris la peine de chercher si les règles de calcul de la mécanique quantique pouvaient s'insérer dans cette philosophie naturelle sans inconséquence. Il s'est aperçu que cela n'allait pas du tout de soi ! D'où la célèbre controverse Bohr-Einstein. Encore une fois, notre paresse d'esprit en ces matières nous pousse à résumer cette controverse en disant « Bohr a gagné ». Nous négligeons de nous informer des conditions de cette victoire. Or ces conditions je vais vous les dire : Bohr n'a pu réfuter l'argument d'Einstein, Podolsky et Rosen qu'en faisant explicitement appel à l'idée n° 2. Vous voyez donc quelle inconséquence logique nous commettons quand nous disons simultanément :

- 1) je peux ignorer les objections d'Einstein puisqu'elles ont été réfutées par Bohr et
- 2) je refuse l'idée n° 2 de Bohr.

Vers la fin de sa vie Einstein a formulé en quelques mots l'essence de ses objections. Pour cela il a énoncé le principe suivant, que nous appellerons principe de séparabilité. Si S_1 et S_2 sont deux systèmes ayant interagi dans le passé mais qui maintenant sont séparés par un intervalle du genre espace « la vraie situation, la situation de fait du système S_2 est indépendante des manipulations qu'on fait subir au système S_1 » (Einstein dans *Albert Einstein philosophe-scientist*, P. A. SCHILP, ed. Evanston 1949).

Il est facile de montrer que la mécanique quantique orthodoxe (*sans* variables cachées pour les experts) ne peut satisfaire ce principe qu'en contredisant des notions tellement fondamentales que vraiment les physiciens se refusent à les jeter par-dessus bord. Si ce principe est vrai, la mécanique quantique orthodoxe est par conséquent en difficulté.

Ici encore, notre paresse d'esprit est parfois grande ; elle nous pousse à dire : le principe de séparabilité est arbitraire puisque nous savons qu'il existe des corrélations. Mais cette réponse, bien qu'on la trouve formulée parfois par des auteurs très éminents, prouve seulement que ces derniers ont négligé de s'informer de la vraie nature du problème. Einstein n'était pas innocent au point de nier la possibilité des corrélations. Aussi son principe de séparabilité parle-t-il de toute autre chose. Il ne nie pas que nous puissions, en observant S_2 , modifier notre *connaissance* de S_1 . Il nie que nous puissions modifier la *réalité physique* de S_1 , ce qui est tout autre chose et ce qui semble l'évidence même. Et pourtant c'est un postulat aussi simple qui suffit à mettre la mécanique quantique orthodoxe en difficulté.

Nous n'avons malheureusement pas le temps de parler de l'état *actuel* de ce sujet. C'est regrettable car des progrès substantiels ont été faits ces derniers temps à cet égard. Résumons-les en deux mots. Einstein espérait réconcilier le principe de séparabilité et les *prédictions observables* de la mécanique quantique en faisant l'hypothèse de variables cachées. J. Bell a montré que c'était impossible. On se demande maintenant s'il n'y aurait pas, dans des corrélations à longue distance, des violations de la mécanique quantique qui sauveraient la séparabilité. Et on fait des expériences pour le savoir. Sans vouloir préjuger des résultats de ces expériences, je ferais plutôt, pour ma part, l'hypothèse que les prédictions observables de la mécanique quantique sont justes et donc que la réalité ultime — pour autant que cette notion ait un sens — est effectivement non-séparable : viole le principe de séparabilité. Et maintenant nous pouvons revenir au problème du hasard évoqué au début : il se pourrait bien que, en ce qui concerne cette réalité non séparable, L. de Broglie ait eu raison : qu'il y ait *déterminisme*, et variables cachées non séparables. Nous n'en savons rien. Il y a des arguments pour et contre. Encore une fois nous n'avons pas le temps d'en discuter. En outre, le sujet est en pleine évolution et donc, comme il est naturel controversé : et dans une réunion comme celle-ci tout ce que nous devons faire c'est de *signaler l'existence* de ces questions controversées. Sans entrer dans la discussion. C'est dans le même esprit que j'aimerais mentionner

brèvement l'existence de la théorie d'Everett qui croit à la fonction d'onde de l'Univers et à l'existence de superpositions quantiques d'états de conscience. Bien que personnellement j'y perçoive des difficultés. Mais enfin, c'est du choc des idées que dit-on jaillit la lumière et donc il faut connaître l'existence de toutes ces idées. J'espère vous avoir montré que, contrairement à l'opinion de beaucoup de gens même cultivés, la pensée sous-jacente à la physique actuelle n'est pas une pensée parcellaire, une simple méthodologie. Pour des esprits à tendance littéraire elle est certes ardue d'accès ; cela limite son audience mais pas du tout son importance. Ainsi par exemple elle permet d'éclairer la controverse entre Jacques Monod et les dialecticiens. Ils ont tort les uns et les autres. Monod a tort parce que son attitude tend à nous présenter le monde et les êtres qui le constituent comme des machines dont les atomes et les molécules seraient les rouages élémentaires. Il érige abusivement un modèle en absolu. Les dialecticiens condamnent avec raison ce *mécanisme*, tout à fait dépassé, nous l'avons vu, par la physique contemporaine. Mais d'un autre côté les dialecticiens ont tort de ressasser depuis cent ans l'idée de vraies *contradictions de la Nature*, et de confondre « contradiction » et évolution dans le temps. Des affirmations telles que « la germination est la négation du grain » ne sont que de poussiéreuses puérités et Monod a raison de les dénoncer comme telles. Elles sont aux antipodes de toute pensée scientifique.

En fait, les dialecticiens ont quand même rendu un service. Ils ont popularisé (bien qu'en la déformant) une idée saine, qui s'inscrit bien dans le développement de la physique contemporaine. Cette idée est que, à aucun moment du développement de la pensée, nous ne disposons de concepts qui soient vraiment adaptés au Réel. Aussi ne pouvons-nous construire que des *modèles* dont le succès n'est que partiel. Comme ils sont fondés sur des concepts qui ne cernent qu'imparfaitement le réel, tôt ou tard ces modèles conduisent à des contradictions apparentes. Qui ne sont pas du tout des contradictions de la *Nature* puisqu'en inventant un bon formalisme on a toujours pu les faire disparaître. Mais bien entendu de nouvelles expériences sont faites, qui à un degré plus élevé contredisent le nouveau formalisme et le processus continu. Il apporte chaque fois un *progrès* et une vision du Réel plus subtile que la précédente.

Maintenant autre chose : cette pensée générale de la physique peut-elle guider notre recherche ? Elle l'éclaire, oui. Mais je crois qu'elle ne la guide pas vraiment. Et qu'il reste à l'heure actuelle très difficile de déterminer quels types de recherches théoriques sont les plus valables. Il y a l'attitude très *pragmatiste*, ou guidée uniquement par la *praxis*, qui est une attitude valable, très en honneur depuis une vingtaine d'années. « La science, disait Valéry, est l'ensemble des recettes qui réussissent toujours ». Beaucoup de nos collègues pensent ainsi et on ne saurait les en blâmer. D'autres prônent un certain *mathématisme* : conciliable d'ailleurs avec le pragmatisme. Ils

ont raison : des mathématiques il en faut. Mais je crois que nous devons aussi prêter l'oreille aux grandes inquiétudes d'Einstein et de L. de Broglie et aux voix moins connues de physiciens plus jeunes de tous pays, qui nous disent que les recettes ça ne leur suffit pas, qu'il doit y avoir une Réalité en dehors de nos sens ou de notre esprit, et que si la science veut essayer de l'approcher cela lui impose peut-être des exigences particulières qui vont au-delà des recettes. Formuler ces exigences est difficile et périlleux. C'est un rôle ingrat de les énoncer en détail, car on risque évidemment l'arbitraire. Mais face à ce qui apparaît maintenant comme un excès de pragmatisme — de néopositivisme — il fallait que ces exigences soient formulées au moins à titre d'hypothèses à mettre à l'épreuve.

Permettez-moi de terminer cet exposé par un hommage à M. de Broglie pour avoir, précisément, tenu ce rôle. Nous, physiciens, ne lui devons pas seulement l'étincelle initiale qui a provoqué toute cette explosion de découvertes centrées sur la fonction d'onde. Car *en outre*, durant ces cinquante dernières années, et parfois bien seul, il aura été, en quelque sorte, notre conscience à propos de ce point précis : la physique n'est pas qu'une super-technologie. Il doit y avoir une Réalité, même si elle n'est pas une machine, même si elle est profondément cachée et difficile à pénétrer, et un des rôles de la Science est d'en discerner toujours mieux les traits, et ses rapports avec nous-mêmes. A M. de Broglie nous devons la mécanique ondulatoire et bien sûr c'est là l'essentiel. Mais nous sommes aussi redevables à sa vigilance pour le rôle si important que la mécanique ondulatoire continue de jouer dans l'évolution des idées.

★

★

★