

1 / Physique et Réalité, une introduction à la question

Bernard d'Espagnat

Il est banal de dire que le développement de la physique durant les trois derniers siècles a fait évoluer nos idées et jusqu'aux concepts par lesquels nous les exprimons. Une remarque si générale ne surprendra, bien sûr, personne. C'est à mesure que nous prenons connaissance de l'ampleur de l'évolution en question que notre étonnement, peu à peu, perce, croît, prend consistance, et cela jusqu'à revêtir, quand nous en savons assez long, la forme d'un aveu de grave désorientation. En fin de compte, veux-je dire, nous nous voyons contraint de reconnaître que nombre de nos évidences en apparence les plus claires, de celles sur lesquelles nous fondons notre vue normale des choses, ne sont guère plus que d'utiles recettes mnémotechniques. Qu'en tant qu'évidences premières elles sont à mettre au rancart. Par quoi les remplacerons-nous ? Question difficile qui, je me hâte de le dire, sera, dans ce fascicule, débattue mais non résolue. Que l'on se rassure cependant. En dépit — si ce n'est à cause — de cela, la physique se développe de façon enrichissante. En tout cas, l'état de perplexité dans laquelle elle plonge, depuis un siècle, les gens qui la pratiquent et cherchent à penser ne l'empêche aucunement d'avancer à pas de géants dans le domaine qui, au sens le plus strict, est le sien propre : celui du prédictif d'observations.

Pour expliciter l'évolution dont je viens de marquer toute l'étendue j'en distinguerai trois moments : l'échec du « réalisme proche » ou « mécanisme cartésien », celui, récent, de l'idée de localité, entraînant la crise de l'atomisme et enfin la grande question, posée d'une manière précise et insistante par la physique elle-même, qui est celle de savoir ce à quoi se rapportent la physique et jusqu'à notre expérience de tous les jours. Cette dernière question est philosophique et l'on ne s'étonnera donc pas qu'elle suscite différentes réponses, même en provenance de personnes compétentes en la matière. Je précise que celle que je décrirai est la mienne propre et qu'elle n'engage que moi.

1- Échec du mécanisme cartésien.

Sur ce premier point, je peux me permettre d'être bref. C'est certes à juste titre que l'on crédite Descartes d'avoir, l'un des tout premiers avec Galilée, introduit les mathématiques dans la physique et les autres sciences. Mais l'idée ne lui est pas venue qu'il était possible de fonder sur elles des concepts physiques entièrement nouveaux. La liste qu'il dresse (dans les *Principes de la philosophie*) des « notions claires et distinctes qui peuvent être en notre entendement touchant les choses matérielles » ne comporte que celles « des figures, des grandeurs et des mouvements, et des règles suivant lesquelles ces trois choses peuvent être diversifiées l'une par l'autre », et il nous dit expressément qu'il faut « que toute la connaissance que les hommes peuvent avoir de la nature [soit] tirée de cela seul ». Cette conception, qu'on appelle le *mécanisme*, revient, on le voit, à considérer que, du moins dans le domaine de « l'étendue », autrement dit

de la matière, tout, en fin de compte, est descriptible au moyen des concepts de la liste en question, dont on remarque tout de suite que tous ses éléments sont des concepts familiers, des concepts dont, depuis la nuit des temps, l'homme a toujours disposé.

Je note, en passant, que la plupart de nos collègues des autres sciences, biologie, géologie etc., en sont plus ou moins restés à ce stade : et cela simplement du fait que le mécanisme est pour eux, un très bon modèle — par exemple : il résulte de la mécanique quantique elle-même que les grosses molécules se comportent plus ou moins, en apparence, comme les pièces d'un jeu de lego. Mais nous, physiciens, nous savons depuis longtemps que notre science elle-même nous oblige à dépasser le cadre des concepts familiers. Pensons à Einstein, à l'équivalence masse-énergie, au tenseur de courbure etc. Sur le plan expérimental, pensons au processus de création de particules — ou de paires particules-antiparticules — dans les chocs à haute énergie. Le phénomène est observé et, certes, la théorie le maîtrise d'une manière satisfaisante. Mais c'est un fait que les diverses manières que celle-ci a de le décrire — que ce soit par la théorie des champs, par celle de la « mer de Dirac » ou par la « théorie des positrons » de Richard Feynman, — font toutes appel à des concepts non familiers, débordant du cadre du mécanisme.

2 - La réfutation du principe de localité.

Imaginons un psychanalyste de fantaisie ayant affaire à un très grand nombre de couples et qui opérerait comme suit. Il enverrait les hommes à la cave, les femmes au grenier, empêchant de ce fait, dès ce moment, toute communication au sein des couples, et il chargerait deux assistants d'interroger, l'un les premiers, l'autre les secondes. À tous, la même question serait posée et les assistants noteraient, chaque fois, nom de famille et réponse. Supposons que la question soit de celles dont la réponse — à donner par « oui » ou par « non » — n'est pas dictée de façon patente par les faits : opinion politique, par exemple. Imaginons, enfin, qu'à la fin de l'opération les assistants, en comparant leurs notes, constatent une corrélation parfaite entre les réponses données par les couples : quel que soit le nom X, si M. X a répondu « oui », Mine X a répondu « oui » et si M. X a répondu « non », son épouse, elle aussi, a répondu « non ». Cette parfaite corrélation ne peut être le fruit du hasard, mais elle est susceptible d'une explication évidente. Il suffit d'admettre que, dès avant leur séparation, mari et femme s'étaient, au sein de chaque couple, formés une opinion commune concernant le sujet de la question posée.

En physique, on conçoit aisément des montages expérimentaux induisant des phénomènes de corrélation à distance similaires, en apparence, à celui de cet apologue. On utilise à cet effet des sources de paires de particules, les deux éléments de chacune des paires étant envoyés dans deux directions opposées et étant soumis, à grande distance, à des mesures. Si ces événements-mesures sont suffisamment éloignés dans l'espace et proches dans le temps l'un de l'autre on s'estime fondé à juger que, tout comme dans l'apologue qu'on vient de voir, il n'y

a entre eux aucune connexion causale *directe*, ce que l'on exprime en disant qu'un « principe de localité » est satisfait. Si, entre les résultats obtenus, on constate une corrélation, on tend donc à lui donner une explication toute simple, calquée sur celle qui marche si bien dans l'apologue : autrement dit, une explication, *primo*, réaliste — les particules et leurs propriétés sont conçues comme existant indépendamment de la connaissance qu'on peut en avoir — et, *secondo*, conforme, je le répète, au « principe de localité » — autrement dit, fondée sur une corrélation supposée exister entre paramètres attachés aux particules elles-mêmes, tout comme, dans l'apologue, l'explication est fondée sur l'identité des opinions politiques des deux éléments d'un même couple. Et c'est effectivement là une vue des choses que, jusqu'à il y a une trentaine d'années, un philosophe eût encore pu, très légitimement, soutenir.

Mais aujourd'hui, comme Jean Bricmont nous l'expliquera grâce au théorème de Bell¹ et aux expériences associées, telles celles faites à Orsay par le groupe d'Alain Aspect², on sait de façon sûre que cette explication est fautive. Ou, pour dire la même chose en d'autres termes, on sait que, dans le domaine des idées fondamentales, toute théorie « réaliste, locale » est nécessairement en contradiction avec certains faits expérimentaux observés. Comme notre vision classique du monde s'inscrivait, précisément, dans le cadre d'une conception « réaliste » et « locale » (absence de relations causales directes entre événements suffisamment éloignés dans l'espace et proches dans le temps, potentiels d'interaction diminuant tous avec la distance etc.), la découverte de John Bell est d'une importance considérable. En particulier, elle a pour conséquence de grandement restreindre la portée philosophique de la théorie atomique. Celle-ci, en effet, apparaissait comme l'exemple par excellence d'une théorie réaliste, locale et, en tant que telle, la non-localité la réfute. Elle demeure valable, bien entendu, mais seulement à titre de modèle utile : non pas une approximation mais plutôt une manière, pratique dans bien des cas, de symboliser le déroulement des phénomènes. Notons enfin que la non-localité, qui manifestement serait très difficile à expliquer dans le cadre de la mécanique classique, est, en revanche pleinement compatible avec la mécanique quantique ; de fait, son existence fut même suggérée par celle-ci, par le biais d'un formalisme mathématique que je n'ai pas le temps de développer.

3- Le problème de l'objet de la physique.

La physique fournit les assises explicatives, sinon de l'ensemble de notre expérience, du moins de toute celle qui concerne, en gros, le règne inanimé. Une affirmation aussi vague — quasiment une définition — est peu sujette à objection, du moins aussi longtemps que l'on prend l'expression « notre expérience » en son sens authentique, celui de quelque chose qui se rapporte à nous. Mais, bien entendu, de la physique — associée aux autres sciences — nous

¹ - J.S.Bell, *Physics* 1, 195 (1964) ; « Speakable and Unspeakable » in *Quantum Mechanics*, Cambridge University Press, London, 1987.

² A. Aspect, P. Grangier et G. Roger, *Physical Review Letters* 49, p. 91 (1982) ; A. Aspect, J. Dalibard et G. Roger, *Physical Review Letters* 49, p. 1804 (1982).

attendons, généralement, beaucoup plus. Nous espérons d'elle qu'elle nous décrive le monde tel qu'il est ou tout au moins qu'elle vienne à notre secours dans notre effort pour le connaître. Certes, nous savons déjà que cette description, elle ne pourra pas la couler dans le moule du mécanisme cartésien. Mais à l'heure actuelle nous sommes, en général intellectuellement disposés à écarter, si cela s'avère nécessaire, les étroites limites de celui-ci. De fait, sous l'inspiration de la théorie électromagnétique, de la relativité générale etc., il s'est développé, chez les physiciens en tout cas, une conception de la connaissance que, par référence à l'Einstein de l'âge mûr, on pourrait appeler l'*einsteinisme*. L'einsteinisme est l'idée que la réalité en soi est structurée et que, grâce aux mathématiques, qui fournissent — enfin ! — les bons concepts, cette réalité est connaissable. La présentation suivante en a été donnée par Einstein lui-même.

Il y a quelque chose comme « l'état réel » d'un système physique, état qui existe objectivement, indépendamment de toute observation ou mesure et qui peut en principe être décrit par les moyens d'expression de la physique [Quels moyens d'expression, et par conséquent quels concepts fondamentaux sont à utiliser à cet égard (points matériels, champs, moyens de détermination encore à inventer), ceci, à mon avis, est actuellement inconnu]. En raison de sa nature « métaphysique », cette thèse concernant la réalité n'a pas le sens d'un énoncé clair en soi. Elle a seulement le caractère d'un programme [...]. Elle est, il est vrai, arbitraire du point de vue logique. Mais la laisse-t-on choir que c'est alors une rude affaire que d'échapper au solipsisme.

Albert Einstein (dans Louis de Broglie, *physicien et penseur*, Albin Michel 1953)

Il est indéniable que cet einsteinisme représente déjà un très grand changement — et un progrès immense — par rapport au mécanisme cartésien. Je vais cependant tenter de montrer que l'einsteinisme n'est pas, malgré tout, le « fin mot de l'histoire » et qu'il faut, lui aussi, le dépasser. Pour cela j'ai trois arguments, de portées d'ailleurs assez inégales.

Premier argument. La sous-détermination de la théorie par l'expérience.

Considérons, par exemple, la théorie des particules. Durant ce dernier demi-siècle, elle a suscité trois principales ébauches de représentations du monde. Il s'agit, dans « l'ordre d'entrée en scène », de celles émanant de la théorie de la mer de Dirac, de la théorie quantique des champs et de la méthodologie de Feynman. Ces trois constructions théoriques prévoient les mêmes résultats d'observation. Il n'existe aucune expérience susceptible de les départager. Aussi, dans l'exercice de notre travail de prédiction d'observations, sautons-nous fort allègrement, nous physiciens, de l'une à l'autre, considérant qu'il s'agit de versions plus ou moins générales mais équivalentes d'une même théorie fondamentale. Il n'en est pas moins vrai que, comme les personnes qui les connaissent peuvent immédiatement le constater, les représentations de la réalité suggérées par les concepts propres à chacune de ces théories sont extrêmement différentes et manifestement incompatibles.

Il y a là une difficulté pour l'einsteinisme car celui-ci a les caractères d'une ontologie. Comme il ressort clairement de la citation précédente, l'einsteinisme vise à découvrir les vrais concepts : ceux qui correspondent vraiment à ce qui *est*.

Or, on a ici trois descriptions que, même si chacun de nous a, sur la base de ce qu'il fait dans son travail, ses préférences, il est impossible de discriminer objectivement par un recours à l'expérience. C'est là un premier argument en faveur d'un dépassement du réalisme physique, y compris sous sa forme « einsteinienne ».

Deuxième argument. L'objectivité faible

Cet argument se fonde sur la mécanique quantique et sur le rôle essentiel que ses principes premiers jouent aujourd'hui en physique. Il repose sur le fait que, telle que nous l'enseignons et l'utilisons, la mécanique quantique est une théorie à objectivité seulement « faible ».

Ce que j'entends par là requiert explication. La science est objective, nous en convenons tous. Mais quand on a affirmé cela on n'a pas encore tout dit car, même en science, le mot est utilisé en deux sens différents. Indéniablement, la plupart des assertions scientifiques ont une forme qui permet de les interpréter — à tort ou à raison — comme nous renseignant sur des attributs, éventuellement contingents, de la chose étudiée elle-même. Les énoncés du type « deux corps ayant telle et telle masse et situés à telle et telle distance l'un de l'autre s'attirent selon telle et telle force » et, plus généralement, tous les énoncés fondamentaux de la physique classique — à l'exception, curieusement, de ceux de la mécanique statistique — sont de ce type. Je dis qu'ils sont « fortement objectifs » pour les distinguer d'énoncés d'un type différent et qui pourtant sont eux aussi considérés comme objectifs. Il s'agit de ceux qu'on exprime sous la forme de règles universelles de prévision d'observation. De ceux-ci nous dirons qu'ils sont à objectivité seulement faible³. Contrairement à ceux à objectivité forte ils nous mettent nous-mêmes en jeu, mais ils sont valables pour n'importe qui, dans n'importe quelle situation, et c'est pour cela qu'ils sont objectifs.

Or, je le répète, certains des principes de la mécanique quantique que l'on considère comme fondamentaux sont à objectivité seulement faible dans le sens qui vient d'être dit. C'est en particulier le cas de la fameuse règle de Born, qui donne la probabilité d'obtenir un certain résultat quand on mesure telle ou telle grandeur. En ce qui concerne, par exemple, les mesures de position, la règle en question nous informe que la quantité à considérer est $|\psi(x, y, z)|^2$, le carré du module de la fonction d'onde en un point (x, y, z) . $|\psi(x, y, z)|^2$ est donc une probabilité. Mais probabilité de quoi ? En français, l'usage est de l'appeler « probabilité de présence » — sous-entendu au point (x, y, z) — mais l'expression est trompeuse. Elle paraît signifier que, à chaque instant, les coordonnées x , y et z de la particule ont une valeur déterminée mais inconnue, peut-être même inconnaissable. Or si cette idée était juste il serait difficile de ne pas en inférer que, dans une expérience de fentes de Young, chaque particule passe par une fente et une seule. Mais, d'autre part, il est bien clair qu'une telle description du phénomène est incompatible avec l'explication des franges fournie par la mécanique quantique « orthodoxe » — sans variables cachées explicitement

³ B. d'Espagnat, *Le réel voilé*, Fayard, 1994.

introduites dans la théorie —, car cette explication se fonde sur l'idée que chaque élément de l'entité composant le faisceau passe à la fois par les deux fentes.

L'expression anglaise pour qualifier le $(x, y, z)^2$, « *probability to be found* » — probabilité d'être trouvée — est, par conséquent, dans la mécanique quantique orthodoxe, la seule acceptable et doit être prise au sens littéral. Cette mécanique ne se soucie pas de nous faire savoir si une particule est à un certain moment ici ou là, ou avec quelle probabilité elle s'y trouve. Contrairement à la physique classique, elle ne postule même pas implicitement que la question possède un sens. Elle nous informe seulement de la probabilité que nous avons de trouver ici ou là la particule si nous la cherchons à cet endroit. Au reste, la conclusion est la même quelle que soit la grandeur physique à laquelle on s'intéresse, qu'elle soit ou non de la nature d'une position. En effet, le formalisme comporte une formule — que l'on peut appeler « règle de Born généralisée » — qui, étant données une grandeur physique et la liste des valeurs qu'on peut lui trouver, fournit la probabilité que nous avons d'obtenir, lors d'une mesure de cette grandeur, telle de ces valeurs plutôt qu'une des autres. Et il se trouve que si, naïvement, on voulait interpréter ceci en posant que la grandeur en question avait déjà, avant toute mesure, la valeur en question — avec une certaine probabilité — le formalisme quantique déboucherait sur des prédictions erronées concernant d'autres mesures possibles. On est ainsi conduit à considérer que ce qui est fondamental dans la mécanique quantique « orthodoxe » ce n'est pas le descriptif, c'est le prédictif d'observation.

Il est vrai que l'on pourrait se demander si cette conclusion n'est pas abusivement circonstancielle. Si elle ne procède pas tout simplement du fait — contingent — que les physiciens du début du XX^e siècle qui mirent la mécanique quantique sur pied se trouvaient être plus intéressés par les règles prédictives d'observations que par la description de la réalité. Rappelons-nous, en effet, que l'avènement de la mécanique quantique a coïncidé avec la grande époque du positivisme logique c'est-à-dire d'une philosophie qui soutenait que n'a de sens que l'observable. Certes les prédictions de la mécanique quantique n'ont jamais été infirmées par les faits, mais, vu les fréquentes « sous-déterminations des théories par l'expérience », on peut s'attendre à ce qu'il existe d'autres théories fournissant les mêmes prédictions et *a priori* il est concevable qu'il y en ait parmi elles qui soient à la fois ontologiquement interprétables et scientifiquement convaincantes, ce qui sauverait le réalisme physique, au moins dans sa version « einsteinienne ».

Alors, y en a-t-il ? C'est relativement à ce point que les participants à notre groupe ne nourrissent pas tous la même opinion. Et cela même si tous sont d'accord pour rejeter une présentation encore assez courante de la mécanique quantique qui, laissant dans le vague les points délicats plus haut rapidement décrits, donne à croire que le formalisme mathématique de cette mécanique serait, sans adjonctions ni modifications, susceptible d'une interprétation descriptive, donc réaliste. En fait, la réponse à la question posée dépend de façon cruciale de ce qu'on entend par la condition, ci-dessus imposée à toute théorie, d'être « scientifiquement convaincante ». Si, pour les besoins de l'argumentation,

on écarte momentanément cette condition, la réponse à la question ici posée est sans équivoque et elle est « oui ». Louis de Broglie, en 1927, a proposé une théorie à variables « cachées »⁴, plus tard redécouverte et grandement généralisée par David Bohm⁵, qui, effectivement, au moins dans le cadre non-relativiste, retrouve, en droit, toutes les prédictions observables de la mécanique quantique « orthodoxe », tout en étant objectivement interprétable. Jean Bricmont, tout à l'heure, nous en développera les mérites. En vérité, ceux-ci sont grands. En effet, comme on le verra, la théorie est entièrement cohérente et, du fait, précisément, qu'elle est ontologiquement interprétable, elle fournit des phénomènes une explication qui satisfait pleinement l'esprit. D'un autre côté, comme Michel Bitbol le fera sans doute valoir, si l'explication en question nous séduit, c'est peut-être pour une raison plus formelle qu'il ne semble au premier abord. En effet, si elle est bien du type de celles auxquelles le mécanisme cartésien nous a habitués, en revanche, contrairement à ces dernières, « les structures descriptives qu'elle greffe sur le formalisme prédictif de la mécanique quantique sont [...] telles qu'elles impliquent d'elles-mêmes l'inaccessibilité à l'expérimentation »⁶. Par ailleurs, pour qu'une adhésion à la théorie dont il s'agit ne soit pas une régression, il faudrait que les formes les plus élaborées de la théorie dite « des particules » — je pense ici à la théorie des champs, à ses développements selon les techniques feynmaniennes, aux symétries internes, aux supersymétries, aux supercordes etc. — soient reformulables dans son cadre, ce qui peut apparaître comme un programme à l'ambition démesurée.

Sont-ce là des raisons de considérer que la théorie en question et d'autres modèles similaires ne sont pas scientifiquement convaincants? Comme beaucoup, je le pense. Mais plusieurs des interventions qui suivront nous permettront de nous former une vue plus détaillée et plus précise des tenants et aboutissants de cette question-là. Pour l'heure, disons seulement que, en tout cas, les données que je viens de rappeler révèlent ce qui, dans la mécanique quantique, est véritablement solide. Elles montrent que ce n'est pas sa sous-jacente ontologie — qui reste problématique, comme on le voit ! — mais bien l'ensemble de ses règles de prévision d'observations.

4- Une pseudo-ontologie.

Je le répète : la théorie de Louis de Broglie et David Bohm n'est, à mes yeux comme à ceux de la majorité des physiciens, pas scientifiquement convaincante. Reste, encore une fois, qu'elle est pleinement cohérente. Elle vise explicitement le réalisme — l'ontologiquement interprétable — et elle l'atteint. À l'autre extrémité de l'éventail philosophique on trouve une autre théorie conceptuellement cohérente. C'est l'interprétation de Copenhague lorsque celle-ci est comprise comme assignant à la physique le rôle de décrire, non du tout la réalité, mais bien l'ensemble de l'expérience humaine communicable. D'un autre côté, il est de fait qu'à tort ou à raison la plupart des physiciens restent attachés

⁴ L. de Broglie, *Journal de Physique* 5, p. 225 (1927).

⁵ D.Bohm, *Physical Review* 85, p. 165, p. 180 (1952)

⁶ M.Bitbol, *L'aveuglante proximité du réel*, Flammarion, 1998.

à la visée réaliste. Comme, en même temps, ils sont tous impressionnés à juste titre par les succès de la mécanique quantique et qu'ils le furent longtemps par le prestige qui en rejaillissait sur les fondateurs de celle-ci, ils se sont trouvés, sans toujours s'en apercevoir, dans une position conceptuelle fautive. Certains ont tenté d'en sortir et en particulier beaucoup de physiciens dits fort improprement « des particules » — dont la discipline est entièrement fondée sur les grandes idées de Feynman — paraissent s'être construits, à partir de ces dernières, une sorte de pseudo-ontologie de remplacement. Je n'entrerai ici, bien sûr, dans aucun détail de calcul. Je dirai donc seulement qu'à mon avis il s'agit là, en fait d'une illusion. Selon moi, celle-ci se rattache directement à ce que je notais tout à l'heure concernant l'impropriété du terme « probabilité de présence » qui renvoie faussement à une réalité en soi. Feynman lui-même a souvent souligné combien il est difficile d'interpréter la physique quantique en termes réalistes. Mais en même temps il répugnait à discuter de tels sujets, qu'il semble avoir tenu pour « dangereusement » philosophiques. Aussi trouva-t-il une manière ingénieuse de court-circuiter la difficulté⁷.

En bref, il introduisit la notion d' « amplitude de probabilité d'arriver à un point donné B », et cela même quand B est un « point intermédiaire », où aucune mesure n'est faite et où aucune interaction n'a lieu. Certes, il insista sur le fait qu'il s'agissait là d'amplitudes et non de probabilités. Il n'empêche qu'en glissant dans son texte le verbe « arriver » il escamota le nœud conceptuellement essentiel de l'affaire. En effet, ce verbe, comme le verbe « être », a une connotation éminemment réaliste. Lorsqu'il s'agit d'un « point intermédiaire », ou bien l'emploi de ce verbe signifie que la particule y arrive véritablement — ce qui, « amplitude » ou pas « amplitude », empêcherait les effets quantiques de se produire — ou bien il n'a pas d'autre sens que celui de permettre la formulation rapide et imagée de ce qui n'est en fait qu'une pure et simple recette de calcul. Étant donné que les effets quantiques sont bien là, c'est cette seconde réponse qui, ici, est la bonne et l'on voit donc que la physique feynmanienne des particules — tout comme la mécanique quantique dont elle n'altère en rien les grands principes — est à caractère essentiellement prédictif — j'entends : « prédictif d'observations » — et non descriptif. On peut, cependant, ne pas être nettement conscient du fait que le verbe « arriver » est ici employé dans une acception qui n'est pas l'acception courante, et ce fait peut amener à faussement croire à la possibilité d'une interprétation réaliste de la physique des particules. C'est l'erreur ainsi engendrée que je désigne ici par l'expression « pseudo-ontologie ».

5- L'universalité quantique.

Il y a un siècle, la physique classique pouvait être considérée comme fournissant une assise conceptuelle aux autres sciences et paraissait donc susceptible de devenir, avec le temps, le fondement d'une explication complète de l'ensemble des phénomènes. Mais cette idée a dû être abandonnée puisque la physique classique a émis des prédictions fausses au sein de ce qui, en principe,

⁷ R.P.Feynman, *Physical Review*, 76, p. 749, p. 769 (1949)

constituait le cœur même de son sujet, à savoir la structure intime de la matière. Par contraste, la mécanique quantique n'a, dans aucun domaine, jamais fourni de prédictions observationnelles contredites par l'expérience, alors qu'elle est au centre des disciplines les plus diverses. Il résulte de cela que, s'il est, aujourd'hui, une théorie universelle, celle-ci ne paraît pouvoir être que la mécanique quantique ou, plus précisément, les lois générales de cette mécanique, autrement dit les grandes règles prédictives d'observation dont il vient d'être question.

Reste cependant à savoir si c'est bien le cas. Bien entendu, une condition que toute théorie candidate au rôle de théorie universelle doit nécessairement remplir est celle de la généralité. De ce point de vue, la mécanique quantique est pleinement satisfaisante puisque, édifiée en premier lieu en tant que théorie des atomes et des molécules, elle s'est progressivement avérée pertinente dans tous les domaines de pointe de la physique. En faveur de son universalité, c'est là un argument de poids, mais qui, bien entendu, ne convainc pas à lui tout seul. Tout naturellement nous sommes donc tentés de le compléter par un autre, qui consiste tout simplement à remarquer que tout, dans le monde matériel, apparaît comme étant constitué d'atomes, que ceux-ci sont eux-mêmes constitués de particules et de champs, et que la théorie quantique est précisément celle qui rend compte du comportement des particules et des champs. Dès lors, tend-on à conclure, cette théorie est nécessairement universelle, en ce sens, au moins, que ses lois s'appliquent à tout.

En fait, la non-localité et l'objectivité faible de la mécanique quantique se conjuguent pour affaiblir la portée de cet argument ; la première en jetant le discrédit sur l'idée même de constitution du réel en parties, la seconde en nous révélant que de toute manière la physique ne nous fournit pas de véritables descriptions de « ce qui est ». En outre, la formulation « orthodoxe » de la mécanique quantique, celle de Bohr et de l'École de Copenhague, se fondait expressément sur la prise en considération des instruments de la mesure et sur l'idée que, en dépit du fait qu'ils sont « constitués d'atomes », ceux-ci, du simple fait qu'ils sont utilisés comme instruments, *doivent* être traités par la mécanique classique ; ce qui a conduit le grand physicien russe L. Landau — soviétique mais néanmoins proche, en idées, de Bohr — à écrire sa phrase célèbre : « La mécanique quantique a besoin de la physique classique pour sa propre formulation ».

Aujourd'hui, toutefois, nombre de physiciens quantiques voient les choses différemment. Cela tient à ce que la communauté physicienne a depuis peu réalisé le rôle très important de la *décohérence*. Schématiquement, il s'agit du fait que, les niveaux d'énergie des systèmes macroscopiques étant extrêmement proches les uns des autres, d'infimes perturbations peuvent les affecter, de sorte que, dans des conditions normales, ces systèmes ne peuvent pas être considérés comme vraiment isolés de leur environnement. Ils sont nécessairement enchevêtrés — au sens quantique — avec lui, ce qui fait qu'on ne saurait attribuer à chacun d'eux une fonction d'onde et que, même, on ne peut, en toute rigueur, penser chacun comme constituant une entité — une sorte d' « être en

soi » — individualisée⁸. D'une certaine manière c'est nous qui, sous l'effet de notre équipement sensori-moteur et conceptuel, les séparons intellectuellement et pragmatiquement de l'environnement en question et faisons abstraction de celui-ci. Or cette opération d'abstraction, faite instinctivement dans la vie courante, nous savons maintenant l'effectuer, dans le cadre de la mécanique quantique, par le calcul, et en tirer les conséquences. Il se trouve que celles-ci sont pertinentes relativement à la question qui nous intéresse.

En effet on a pu montrer — je pense ici, en particulier, à certains travaux de Roland Omnès⁹ — qu'en ce qui concerne les systèmes macroscopiques se trouvant dans des conditions non exceptionnelles ces conséquences sont que les *prévisions observationnelles* concernant ces systèmes — prévisions qu'on obtient d'habitude en se servant de la mécanique classique — peuvent se déduire dans le détail des règles prévisionnelles de la mécanique quantique. En d'autres termes, il a été montré que, des règles de prédiction quantiques conçues comme universelles, découle *l'apparence* d'un monde classique. En faveur de l'universalité de la mécanique quantique c'est là, en définitive, un argument d'un très grand poids, même si, comme vous le voyez, la décohérence ne fournit aucunement une justification de *l'ontologie* classique, celle du réalisme naïf, qui considère les objets comme des choses en soi. C'est pourquoi je parle d'« apparences ». Mais des apparences valables pour tous ne sont elles pas, en science, tout aussi bonnes — voire meilleures ! — que des « réalités en soi » ?

Notons enfin que la notion de décohérence et la thèse de l'universalité des lois quantiques reçoivent l'une et l'autre un appui remarquable en provenance des expériences du groupe Haroche¹⁰. Très *grosso modo*, on peut dire, en effet, que ces physiciens ont opéré la déconnexion temporaire d'un objet macroscopique — en fait : mésoscopique — et de son environnement, ont constaté que l'objet jouit alors de propriétés typiquement quantiques, et ont observé qu'en un temps très court, mais fini et même mesurable, il reprend son aspect « classique », sa connexion avec l'environnement s'étant d'elle-même rétablie. Il est clair que si le monde — ou notre appréhension de celui-ci — était régi par deux systèmes distincts de lois fondamentales, l'un, quantique, s'appliquant aux systèmes microscopiques et l'autre, classique, aux systèmes macroscopiques ou tout au moins à la très grande majorité de ceux-ci, ces résultats ne seraient guère compréhensibles. Cette expérience constitue donc un argument difficilement contournable, me semble-t-il, en faveur de l'idée que les lois prédictives d'observation qui constituent le noyau dur de la mécanique quantique sont universelles.

L'ensemble des données que j'ai rappelées me conduit à des conclusions bien définies que je présenterai brièvement comme suit. Il est clair qu'au cours de

⁸ H.Zeh, *Foundations of Physics*, 3, p. 109 (1973) ; D.Giulini, E.Joos, C.Kiefer, J.Kupsch, I.-O.Stamatescu, et H.D.Zeh, *Decoherence and the Appearance of a Classical World in Quantum Theory*. Springer Verlag, 1996

⁹ R.Omnès, *The Interpretation of Quantum Mechanics*, Princeton University Press, 1994.

¹⁰ M.Brune, E.Hagley, J.Dreyer, X.Maître, A.Mali, C.Wunderlich, J.M.Raimond et S.Haroche, *Physical Review Letters*, 77, 4887 (1996).

leur histoire — ou, disons plutôt, de leur préhistoire — les hommes se sont construits des concepts utiles à leur existence. Et il est clair aussi qu'une des questions « brûlantes » qui se posent à qui cherche la vérité est : « devons-nous juger que ces concepts correspondent au réel — à ce qui « vraiment est » — ou qu'ils sont, tout au moins, une bonne approximation du réel ? »

Le fameux principe « ça marche, donc c'est vrai » suggère puissamment la réponse « oui ». Mais nous savons que ce principe n'a rien d'une règle absolue et même que, en science, il est souvent mis en défaut. En fait, il me semble indéniable que, compte tenu des données en question, la réponse, bien au contraire, est nettement « non ». On l'a vu : si vraiment il s'agit d'approcher le réel — « en soi », « ultime », qualifions-le comme on voudra —, les concepts familiers, ceux du mécanisme, ne fournissent même pas une bonne approximation ; et, contrairement aux espérances einsteiniennes, ceux qu'on forge à partir des mathématiques, pour féconds qu'ils soient, ne sont pas, eux non plus, qualifiés pour tenir ce rôle. C'est pourquoi, en une sorte de retour — mais impliquant d'essentielles modifications — au mythe platonicien de la caverne, je parle, pour ma part, de « réel voilé ».

6- Coup d'œil sur la suite

D'un autre côté, non-localité et décohérence sont des notions récentes. Il est normal que leurs interprétations soulèvent encore des difficultés et que leurs implications suscitent des débats. Des débats qui, au reste, ne font qu'alimenter des controverses plus générales portant sur les rapports entre physique quantique et réalité et qui débouchent quasi inévitablement sur des prises de positions relatives à cette notion elle-même.

Les communications qui suivent, même si elles ne couvrent pas l'ensemble des points de vue, en donneront une vue instructive. En gros, François Lurçat, interprétant Niels Bohr dans une perspective husserlienne, y défend l'idée d'« ontologies régionales ». Basarab Nicolescu y prône celle de « niveaux de réalité » comprise conformément à un moment de la pensée de Heisenberg. Jean Bricmont, plus « réaliste » encore que ces deux physiciens, estime, lui, comme le pensait aussi John Bell, que le seul but valable à assigner à la physique est d'expliquer notre expérience en construisant une théorie ontologiquement interprétable, telle celle de Bohm, et cela, en acceptant l'étrangeté, qu'il prend même soin d'explicitier. Dans l'esprit de l'approche pragmatique-transcendante qu'il a exposée par ailleurs, Michel Bitbol lui objecte que de telles théories sont vides de contenu empirique. Enfin, se fondant sur la mécanique quantique, Hervé Zwirn nous donne des raisons de conclure que le vrai but — le but accessible — de la physique est de rendre compte des éléments de l'expérience humaine possible ; et il nous indique comment faire en sorte que la décohérence serve au mieux à cette fin.

Tel est le surprenant — mais fascinant — panorama que dessinent les textes qui suivent. Ce serait une démission que d'y voir un encouragement à un

facile relativisme. Ces positions diverses — certaines, même, opposées, — sont toutes étayées par de valables arguments, dont aucun n'a recours à un quelconque ésotérisme. Il faut donc qu'il y en ait une qui soit plus robuste que les autres... et, pour ma part, on l'a peut-être deviné, j'ai mon idée à ce sujet. Il sied toutefois que, dans ce fascicule, échanges et débats aient, si l'on ose dire, le « dernier mot ».